



**PEDAGOGICKÁ  
FAKULTA**  
Masarykova univerzita

# **Mechanika a molekulová fyzika**

## **Termika**

**Doc. RNDr. Petr Sládek, CSc.**

Pedagogická fakulta  
Masarykova Univerzita  
Poříčí 7, 603 00 Brno



Pro potřeby přednášky zpracováno s využitím [www.studopory.vsb.cz](http://www.studopory.vsb.cz) materialy html\_files

# Termika

## Termika



**Zabývá se zkoumáním tepelných vlastností látek.**

- **Termodynamika** zkoumá chování látek na základě popisu jevů, z měření veličin, ZZE pro tepelné děje, **bez detailní znalosti vnitřní struktury látek** (= termodynamická metoda; spojitě rozložení).
- **Molekulová** a následně **statistická fyzika vychází** z vnitřní struktury látek a jejich vlastnosti vysvětluje jako **důsledek pohybu a vzájemného působení částic látky** (= statistická metoda; nespojitá, diskrétní struktura látky). Představy o diskrétní vnitřní struktuře látek vedly postupně k formulaci **kinetické teorie stavby látek** (konec 19.století)

## Kinetická teorie látek

Je založena na 3 experimentálně založených poznatcích:

- 1. Látka kteréhokoli skupenství se skládá z částic** – molekul, atomů nebo iontů. Prostor, který těleso z dané látky zaujímá, není těmito částicemi beze zbytku vyplněn. ***Látka má nespojitou (diskrétní) strukturu.***
- 2. Částice se v látce pohybují, jejich pohyb je neustálý a neuspořádaný (chaotický).** Částice se pohybují posuvnými, otáčivými nebo kmitavými pohyby. Částice se v látce pohybují rychlostmi různých směrů a různých velikostí. Tuto formu pohybu částic nazýváme ***tepelný pohyb***. V látkovém tělese, které je v klidu, není preferován žádný směr pohybu částic.
- 3. Částice na sebe navzájem působí přitažlivými silami a současně silami odpudivými.** Velikost těchto sil závisí na vzdálenosti mezi částicemi.

## Kinetická teorie látek

Rozměry částic ~ 0,1 nm – dříve nemožné pozorování, dnes elektronový mikroskop.  
O neustálém a neuspořádaném pohybu svědčí nepřímo řada jevů – tlak plynu, rozpínání plynu, difúze, Brownův pohyb ...

Neustálý pohyb molekul plynu uzavřeného v nádobě způsobuje **neustálé srážky** těchto molekul s molekulami vnitřních stěn nádoby uvnitř plynu

→ **příčina tlakových sil a tlaku plynu**, který měříme manometrem.

**Difúze** je samovolné pronikání částic jedné tekutiny mezi částice druhé tekutiny, uvedeme-li je do vzájemného styku.

Zahříváme-li difundující tekutiny, pozorujeme rychlejší průběh difúze a vzrůst teploty tekutin.

→ **Příčinou vzrůstu teploty je zvýšení rychlostí pohybujících se částic.**

## Kinetická teorie látek

***Brownův pohyb*** = neustálý, nepravidelný pohyb malých částic rozptýlených v plynu nebo kapalině, který lze pozorovat mikroskopem.

(Tento jev byl objeven v r.1827 anglickým botanikem R.Brownem – pohyb pylových zrněk ve vodě. Později byl pohyb pozorován i u drobných anorganických částic rozptýlených v tekutině.)

Teorii Brownova pohybu vypracoval kolem roku 1905 A. Einstein.

Existenci *přitažlivých a odpuzivých sil*, kterými částice na sebe navzájem působí, potvrzuje řada jevů:

- *soudržnost pevných a kapalných látek*
- nutnost působení vnějších sil k dosažení zmenšení objemu pevných, kapalných i plynných těles.

## Kinetická teorie látek

Současně *přitažlivé* ( $k_1$ ) i *odpudivé* ( $k_2$ ) síly.

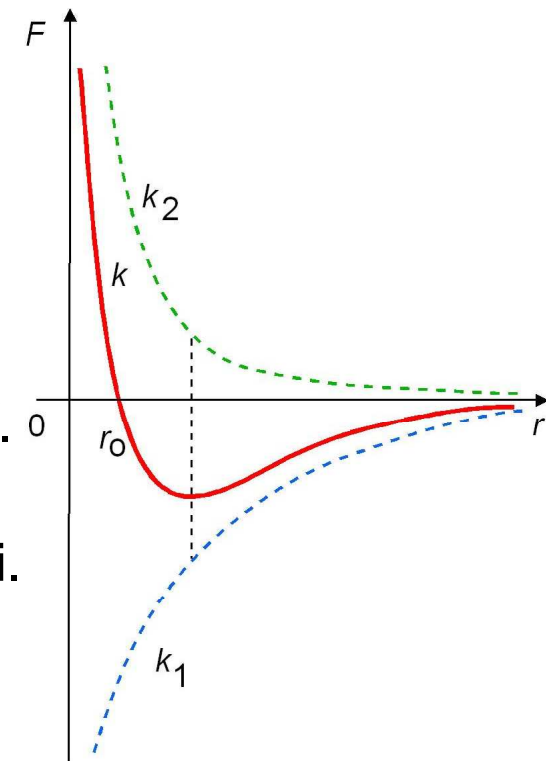
**Výslednice** ( $k$ ) nulová při  $r_0$ , pro větší vzdálenost

Je výsledná síla přitažlivá, velikost klesá rychle

Se vzdáleností – **jen silová pole nejbližších částic.**

Silové pole  soustava částic má *potenciální energii*.

**Vazebná energie** je rovna práci, kterou je třeba vykonat působením vnějších sil k rozrušení vazby mezi částicemi.



## Plynná látka

Za normálních podmínek jsou střední vzdálenosti mezi molekulami plynu ve srovnání s rozměry molekul velké. Pro tyto vzdálenosti jsou přitažlivé síly mezi molekulami malé a můžeme je zanedbat:

- V prostoru, který plyn zaujímá, se všechny molekuly neustále pohybují v různých směrech a různě velkými rychlostmi. Všechny směry jsou stejně pravděpodobné.

Kromě posuvného pohybu vykonávají víceatomové molekuly plynu také rotační pohyb a atomy uvnitř těchto molekul neustále kmitají. Celková kinetická energie soustavy molekul plynu (plynného tělesa) je součtem kinetických energií posuvného i rotačního pohybu všech molekul a kinetických energií kmitajících atomů v molekulách.

- Změna směru a velikosti rychlosti nastává v důsledku srážek molekul s jinými molekulami.

Srážku je třeba chápat tak, že molekuly se k sobě jen přiblíží a odpudivá síla, kterou na sebe navzájem působí při malých vzdálenostech, změní směr a velikost rychlosti molekul.

## Plynná látka

- Mezi jednotlivými srážkami se molekuly plynu pohybují přibližně rovnoměrně přímočaře.
- Čím je vyšší teplota plynu, tím je větší střední rychlost molekul plynu.

**Absolutní hodnota celkové potenciální energie soustavy molekul plynu vždy značně menší než celková kinetická energie těchto molekul.**



## Pevná látka

- Velká většina pevných látek se vyznačuje pravidelným uspořádáním částic. Částice vytvářejí *krystalovou strukturu*. Výjimkou jsou amorfni látky (např. sklo, vosk)..
- Střední vzdálenost mezi částicemi pevné látky je asi 0,2 nm až 0,3 nm.
- Vzájemné přitažlivé síly mezi částicemi způsobují, že pevná látka na rozdíl od plynu vytváří těleso určitého tvaru a objemu.
- Nepůsobí-li na pevné těleso vnější síly a nemění-li se teplota, zůstává tvar i objem tělesa zachován.
- Částice v pevné látce vykonávají kmitavé pohyby kolem svých rovnovážných poloh.

**Celková potenciální energie soustavy částic pevného tělesa podmíněná vzájemným působením částic je v absolutní hodnotě větší než celková kinetická energie kmitavých pohybů těchto částic.**

## Kapalná látka

- Molekuly kapaliny nejsou tak volně pohyblivé jako je tomu u plynu.
- Jsou navzájem k sobě přitahovány silovým polem sousedních molekul a současně vzájemné působení molekul kapaliny není tak silné, aby všechny molekuly byly navzájem vázány jako je tomu u pevné látky.
- Částice kapaliny se vyznačují určitou uspořádaností, ale jen na velmi krátkou vzdálenost.
- Každá molekula kapaliny v silovém poli sousedních molekul kmitá kolem rovnovážné polohy, která se s časem mění, a to tím častěji, čím je větší teplota kapaliny. Proto je kapalina tekutá, nezachovává svůj tvar.

**Absolutní hodnota celkové potenciální energie soustavy částic kapalného tělesa, podmíněná jejich vzájemným silovým působením, je řádově srovnatelná s celkovou kinetickou energií částic kapaliny.**

## Látkové množství

Počet částic v látkovém tělese  $N$ , hmotnost látkového tělesa  $m = Nm_0$ , kde  $m_0$  je hmotnost jedné částice tělesa (hmotnost atomu nebo molekuly).

**Látkové množství  $n$**  chemicky stejnorodé látky je dáno počtem částic  $N$ , které látka obsahuje:

$$n = \frac{N}{N_A}$$

kde  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  je Avogadrova konstanta. (experimentálně určená)

Jednotkou látkového množství je **1 mol**.

1 mol je látkové množství soustavy, která obsahuje právě tolik jednoduchých částic (např. atomů, iontů, molekul), kolik je atomů v nuklidu uhlíku  $^{12}_6\text{C}$  o hmotnosti 12 g.

## Látkové množství

Vzhledem k velmi malé hmotnosti atomů a molekul se ve fyzice a chemii ukázalo výhodné zavést veličiny *relativní atomová hmotnost*  $A_r$  a *relativní molekulová hmotnost*  $M_r$

$$A_r = \frac{m_a}{m_u} \quad M_r = \frac{m_m}{m_u}$$

kde  $m_a$  ( $m_m$ ) je klidová hmotnost atomu (molekuly) a  $m_u$  atomová hmotnostní konstanta (jednotka), definovaná jako 1/12 klidové hmotnosti atomu nuklidu uhlíku  $^{12}_6\text{C}$ . Její přibližná hodnota je  $m_u = 1,66 \cdot 10^{-27}$  kg.

Relativní molekulová hmotnost je rovna součtu relativních atomových hmotností všech atomů, které tvoří molekulu.

## Látkové množství

Veličiny, které se vztahují k látkovému množství 1 mol, nazýváme molární veličiny. Mezi nejdůležitější patří *molární hmotnost*  $M$  a *molární objem*  $V_m$ .

Vzhledem k velmi malé hmotnosti atomů a molekul se ve fyzice a chemii ukázalo výhodné zavést veličiny *relativní atomová hmotnost*  $A_r$  a *relativní molekulová hmotnost*  $M_r$ .

$$M = \frac{m}{n} = \frac{mN_A}{N} = \frac{Nm_mN_A}{N} = M_rN_Am_u \qquad V_m = \frac{V}{n}$$

## Základní pojmy termodynamiky

**Stav tělesa** - látková tělesa mohou mít různý objem, teplotu, tlak, různá skupenství, uspořádání částic (tuha – diamant)

Těleso nebo skupinu těles, jejichž stav zkoumáme, nazýváme **termodynamická soustava** (stručněji jen **soustava**).

Soustava je od svého okolí oddělena skutečnými nebo myšlenými stěnami.

Ostatní tělesa, která se zkoumaným tělesem interagují tvoří **okolí** termodynamické soustavy.

**Stavové veličiny** – určují stav soustavy: tlak, teplota, objem nebo energie.

## Základní pojmy termodynamiky

**Izolovaná soustava** - nedochází k výměně energie s okolím, její chemické složení a hmotnost (počet částic) se nemění.

**Rovnovážný stav soustavy** - Ponecháme-li soustavu od určitého okamžiku v neměnných vnějších podmínkách, pak po určité době přejde samovolně do rovnovážného stavu a v tomto stavu setrvává, pokud zůstanou tyto podmínky zachovány.

V rovnovážném stavu zůstávají **stavové veličiny konstantní** = na soustavě v rovnovážném stavu se nedají pozorovat **žádné makroskopické změny**.

***Přitom se ale všechny molekuly neustále pohybují !***

**Makrostav** se dá realizovat při velkém počtu částic v soustavě určitým počtem **mikrostavů**, které odpovídají daným rozdělením molekul uvnitř nádoby.

## Základní pojmy termodynamiky

Počet mikrostavů určujících daný makrostav určuje **pravděpodobnost výskytu makrostavu**.

***Rovnovážný stav soustavy*** je při neproměnných vnějších podmínkách stavem **s největší pravděpodobností výskytu**.

Probíhá-li určitý děj tak, že soustava při tomto ději prochází řadou na sebe navazujících rovnovážných stavů, pak tento děj nazýváme ***rovnovážný děj***.

Skutečné děje jsou nerovnovážnými ději.



## Teplota jako fyzikální veličina a její měření

Dvě izolovaná tělesa (termodynamické soustavy), která jsou v určitých rovnovážných stavech, uvedeme do vzájemného styku.

- původní rovnovážné stavy nezmění, pak jim přisoudíme tutéž teplotu.
- původní rovnovážné stavy změní a pak říkáme, že na počátku děje měla tělesa různé teploty.

Po určité době samovolně přejdou do nových rovnovážných stavů, charakterizovaných stejnou teplotou.

**Tělesům, která jsou při vzájemném styku v rovnovážném stavu přisuzujeme stejnou teplotu.**

Teplota je stavovou veličinou charakterizující stav *tepelné rovnováhy* soustavy.

Všechny části izolované soustavy mají stejnou teplotu. Teplota není aditivní veličinou (teplota soustavy není rovna součtu teplot jednotlivých částí soustavy).

## Teplota jako fyzikální veličina a její měření

Stav tepelné rovnováhy je tranzitivní.

Jsou-li tělesa A a B ve vzájemné tepelné rovnováze a současně tělesa B a C ve vzájemné tepelné rovnováze, jsou také tělesa A a C ve vzájemné tepelné rovnováze.

Do vzájemného styku uvedeme těleso, jehož teplotu měříme a těleso srovnávací – **teploměr**.

Po vytvoření rovnovážného stavu je teplota tělesa stejná jako teplota teploměru.

Přitom předpokládáme, že při vyrovnávání teplot tělesa a teploměru se teplota tělesa příliš nezmění, takže teploměr i po vytvoření rovnovážného stavu udává původní teplotu tělesa.

*K měření teploty je potřeba sestavit teplotní stupnici a stanovit jednotku teploty.*

## Teplota jako fyzikální veličina a její měření

V denní praxi používáme k měření *Celsiovu teplotní stupnici*, která má dvě základní teploty:

1. Rovnovážnému stavu vody a jejího ledu za normálního tlaku (tj. tlaku  $1,01325 \cdot 10^5$  Pa) přiřazujeme dohodou teplotu  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
2. Podobně rovnovážnému stavu vody a její syté páry za normálního tlaku přiřazujeme teplotu  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

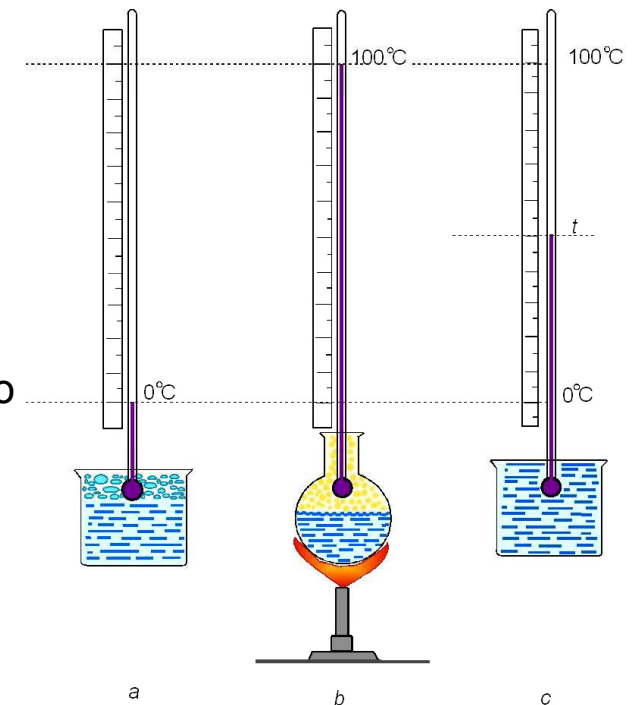
Mezi těmito teplotami je stupnice rozdělena na 100 stejných dílků. Jeden dílek odpovídá  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Na základě změny objemu kapaliny v teploměru měříme pomocí této stupnice *Celsiovu teplotu  $t$* .


Kapalinovými teploměry lze měřit teplotu jen v jistém teplotním intervalu.

Hg: od  $-39\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $357\text{ }^{\circ}\text{C}$ , lihový: od  $-114\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $78\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Vyšší teploty se měří pomocí teploměrů odporových, termočlánků a pyrometrů. Pro měření velmi nízkých teplot se používají odporové nebo magnetické teploměry.



## Teplota jako fyzikální veličina a její měření

Anglický fyzik W.Thomson (lord Kelvin)  stupnice, která je nezávislá na volbě teploměrné látky = *termodynamická teplotní stupnice*.

Teplota vyjádřená v termodynamické teplotní stupnici se nazývá *termodynamická teplota T*.

Jednotkou této teploty je 1 K (kelvin).

Jedna základní teplota = teplota rovnovážného stavu soustavy led + voda + sytá pára.

Tento rovnovážný stav se nazývá *trojný bod vody* a dohodou mu byla přiřazena termodynamická teplota  $T_r = 273,16$  K (přesně).

Kelvin pak definujeme jako 273,16-tou část termodynamické teploty trojného bodu vody. Kelvin je základní jednotkou soustavy SI.

## Teplota jako fyzikální veličina a její měření

K zavedení termodynamické teplotní stupnice a k měření termodynamické teploty se používá plynový teploměr, který využívá poznatku, že tlak plynu  $p$  v nádobě plynového teploměru je přímo úměrný jeho termodynamické teplotě  $T$  za konstantního objemu plynu.

Z experimentů přitom vyplývá, že za jinak stejných podmínek je tlak různých plynů stejného látkového množství téměř nezávislý na druhu plynu.

*Celsiova teplota  $t$*  se definuje pomocí *termodynamické teploty  $T$*  definičním vztahem

$$t = (\{T\} - 273,15)^\circ\text{C} ,$$

kde  $\{T\}$  je číselná hodnota termodynamické teploty.

## Teplota jako fyzikální veličina a její měření

- Termodynamická teplota libovolné soustavy se může přiblížit hodnotě 0 K, nemůže ji však dosáhnout.
- Teplota 0 K je počátkem termodynamické teplotní stupnice.
- Při teplotě 0 K (tj.  $-273,15\text{ °C}$ ) nabývá kinetická energie částic soustavy nejnižší možné hodnoty, ale není nulová.
- V blízkosti teploty 0 K se značně mění vlastnosti látek, např. elektrická vodivost
- V roce 1999 bylo dosaženo nejnižší teploty, pouhých  $100\text{ pK} = 10^{-10}\text{ K}$ , a to v systému jaderných spinů v kovovém rhodiu.

## Teplota jako fyzikální veličina a její měření

Z jiných teplotních stupnic, které se dodnes v některých zemích používají, je nejznámější *Fahrenheitova teplotní stupnice*.

Celsiově teplotě 0 °C odpovídá Fahrenheitova teplota 32 °F

100 °C odpovídá 212 °F.

Teplotnímu rozdílu  $\Delta t = 100$  °C odpovídá rozdíl Fahrenheitových teplot 180 °F.

Převodní vztahy jsou:

$$t_F = (32 + 1,8\{t_C\}) \text{ °F}$$

$$t_C = 5/9(\{t_F\} - 32) \text{ °C ,}$$

kde  $\{t\}$  je číselná hodnota teploty.

## Teplotní roztažnost látek

Teplotní roztažnost se projevuje u látkových těles všech tří skupenství a je způsobena tím, že parametry tepelného pohybu částic látky závisí na teplotě.

### a) Pevná látková tělesa

Částice pevné látky kmitají kolem rovnovážných poloh v krystalické mřížce. Zvětšíme-li teplotu látky, zvětšuje se energie kmitavého pohybu a zvětšuje se amplituda kmitání. Tím roste střední vzdálenosti částic.

**Změna střední vzdálenosti částic se změnou teploty je příčinou teplotní roztažnosti.**

Při změně teploty pevného tělesa se mění jeho rozměry. Tento jev nazýváme ***teplotní délkovou roztažností***.

Pro změnu délky tyče  $\Delta l$  původní *délky*  $l_0$  při *teplotě*  $t_0$  po zahřátí na *teplotu*  $t$  platí:  $\Delta l = \alpha l_0 (t - t_0)$ .

Veličina  $\alpha$  je *teplotní součinitel délkové roztažnosti*.



## Teplotní roztažnost látek

Teplotní součinitel délkové roztažnosti závisí na druhu pevné látky. Jeho hodnota je řádově  $10^{-5} \text{ K}^{-1}$ , proto zvětšení rozměrů těles při zahřívání není zejména u těles malých rozměrů přímo pozorovatelné okem.

Přesná měření ukazují, že teplotní součinitel délkové roztažnosti se poněkud mění se změnou teploty. Pro malé teplotní rozdíly ho lze pro danou homogenní látku považovat veličinu za konstantní.

Kolejnice, dilatační spára, mosty, ...

Zvýší-li se při stálém tlaku teplota tělesa z pevné látky, vzroste i jeho *objem*  $V$ . Pokusy ukazují, že v nepříliš velikém teplotním intervalu je přírůstek objemu  $\Delta V = V - V_0$  přímo úměrný přírůstku teploty  $\Delta t = t - t_0$  a objemu tělesa  $V_0$  při teplotě  $t_0$ .

Platí  $\Delta V = \beta \cdot V \cdot \Delta t$  resp.  $V = V_0 (1 + \beta (t - t_0))$

Konstanta úměrnosti  $\beta$  se nazývá *teplotní součinitel objemové roztažnosti*.

Závisí na druhu látky, z níž je těleso zhotoveno, a  $\beta \approx 3\alpha$ .

## Teplotní roztažnost látek

Při změně teploty pevných látek se mění také jejich hustota. S rostoucí teplotou hustota pevných látek klesá přibližně lineárně v uvažovaném teplotním intervalu.

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{\rho_0 V_0}{V_0 (1 + \beta \cdot \Delta t)} = \frac{\rho_0}{1 + \beta \Delta t}$$

$$\rho \approx \rho_0 (1 - \beta \cdot \Delta t)$$

## Teplotní roztažnost látek

### *b) Teplotní objemová roztažnost kapalin*

Objem kapalin s rostoucí teplotou roste. Přitom různé kapaliny se za jinak stejných podmínek roztahují různě. Pro nepřilíš velké teplotní rozdíly je objem  $V$  kapaliny za stálého vnějšího tlaku určen přibližným vztahem

$$V \approx V (1 + \beta \cdot \Delta t)$$

Pro větší teplotní rozdíly

$$V = V (1 + \beta_1 \cdot \Delta t + \beta_2 \cdot (\Delta t)^2)$$

Teplotní součinitel objemové roztažnosti je obecně větší u kapalin než u pevných látek:

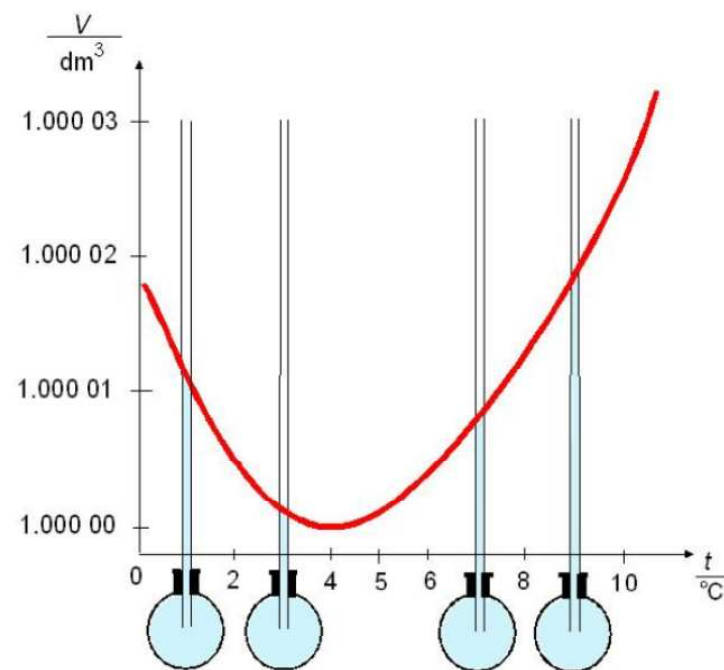
- Hg v teplotním intervalu 0 °C až 100 °C je  $\beta_1 \approx 1,82 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ,  $\beta_2 \approx 8 \cdot 10^{-9} \text{ K}^{-2}$ .
- Etanol v teplotním intervalu 0 °C až 39 °C je  $\beta_1 \approx 7,45 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ,  $\beta_2 \approx 1,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-2}$ .

# Teplotní roztažnost látek

## b) Teplotní objemová roztažnost kapalin

Uvedli jsme si, že objem kapaliny se při vzrůstu teploty zvětšuje. Jednou z výjimek je voda v teplotním intervalu od 0 °C do 3,98 °C. V tomto intervalu s rostoucí teplotou objem vody klesá.

Tato vlastnost vody se nazývá *anomálie vody*. Vysvětluje se tím, že i při teplotě 0 °C zůstávají ve vodě zbytky krystalické mřížky ledu. Při tom střední vzdálenosti molekul vody v ledu jsou větší než v tekuté vodě. Při zvětšování teploty od 0 °C do 3,98 °C zbytky krystalické mřížky ledu postupně mizí, a tím se zmenšují vzdálenosti mezi molekulami H<sub>2</sub>O. Proto se celkový objem vody zmenšuje. Ze závislosti objemu na teplotě pro vodu také plyne, že při teplotě 3,98 °C má voda největší hustotu. Vrstvy vody této teploty se proto nacházejí nejnižše v zamrzávajících vodních plochách a to má velký význam pro přežití vodních živočichů a rostlin.



# Teplotní roztažnost látek

## *b) Objemová roztažnost plynů*

Experimentálně bylo ukázáno, že pro všechny plyny při konstantním tlaku se objem plynu zvětšuje podle vztahu  $V = V_0(1 + \gamma \cdot \Delta t)$

kde teplotní součinitel objemové roztažnosti plynů  $\gamma$  má pro **všechny** plyny hodnotu  $1/273,15 \text{ K}^{-1}$ .

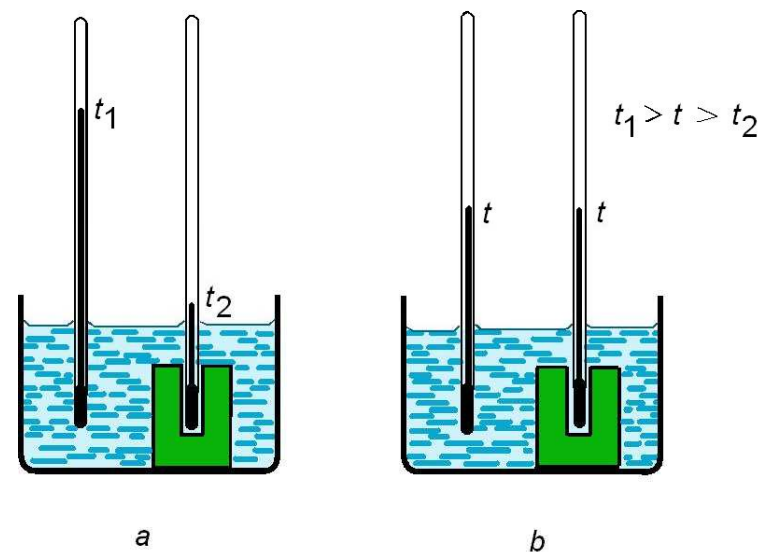
Dosadíme-li za  $\gamma$  do vztahu pro objem a zavedeme-li termodynamickou teplotu, dostaneme známý zákon pro izobarický děj.

## Teplo, tepelné kapacity látek, kalorimetrická rovnice

Pozorujeme vzrůst teploty chladnějšího tělesa a pokles teploty teplejšího tělesa tak dlouho, až nastane rovnovážný stav, při kterém jsou teploty obou těles jsou stejné.

Na rozhraní obou těles dochází ke srážkám částic a při těchto srážkách částice teplejšího tělesa předávají část své energie částicím studenějšího tělesa.

Tento děj, při kterém neuspořádaně se pohybující částice teplejšího tělesa narážejí na částice studenějšího tělesa a předávají jim část své energie, nazýváme **tepelná výměna**.



## Teplo, tepelné kapacity látek, kalorimetrická rovnice

Odevzdá-li teplejší těleso studenějšímu tělesu tepelnou výměnou energii, říkáme, že teplejší těleso odevzdalo studenějšímu tělesu **teplo**. Přijme-li studenější těleso od teplejšího tělesa tepelnou výměnou energii, říkáme, že studenější těleso přijalo od teplejšího tělesa **teplo**.

**Teplo  $Q$  je určeno energií, kterou při tepelné výměně odevzdá teplejší těleso studenějšímu.**

Jednotkou tepla je 1 J (joule).

**„Teplo = energie na pochodu”**

## Teplo, tepelné kapacity látek, kalorimetrická rovnice

■ Nenastane-li současně změna skupenství látky tělesa, je přijaté teplo  $dQ$  přímo úměrné přírůstku teploty.

- $dQ = C \cdot dT$ ,
- kde  $C$  je **tepelná kapacita** tělesa. Jednotkou tepelné kapacity je  $1 \text{ J.K}^{-1}$ .

Protože  $C$  závisí na **hmotnosti tělesa**  $m$ , zavádíme tepelnou kapacitu jednotkové hmotnosti látky, která se nazývá **měrná tepelná kapacita**  $c$

$$c = \frac{dQ}{m dT}$$

Měrná tepelná kapacita je charakteristická pro danou látku. Z běžně známých látek má největší měrnou tepelnou kapacitu voda  $c = 4200 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$  (přibližně), proto je voda výhodná jako chladicí kapalina nebo jako kapalina používaná k přenosu energie. Relativně malé měrné tepelné kapacity mají kovy ( např.



# Teplo, tepelné kapacity látek, kalorimetrická rovnice

U všech látek se s klesající teplotou měrná tepelná kapacita látky zmenšuje a při teplotách blízkých 0 K má velmi malou hodnotu (např. měrná tepelná kapacita olova při teplotě 20 °C je 129 J.kg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> při teplotě -259 °C je 32 J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>).

Pro daný stupeň přesnosti výpočtů lze považovat měrnou tepelnou kapacitu homogenní látky v jistém pokusem ověřeném teplotním intervalu za konstantní.

*Pak*

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

Při tepelných výpočtech zejména pro plyny používáme tepelnou kapacitu vztaženou na 1 mol látky, kterou nazýváme **molární tepelná kapacita**  $C_m = c \cdot M$ , kde  $M$  je molární hmotnost látky. Jednotkou molární tepelné kapacity je 1 J.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>.

Látka	$c$ [J.kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
<u>voda</u>	4 180
<u>vzduch</u> (0°C)	1 000
<u>ethanol</u>	2 430
<u>led</u>	2 090
<u>olej</u>	2 000
absolutně suché <u>dřevo</u> (0°C)	1 450
<u>železo</u>	450
<u>měď</u>	383
<u>zinek</u>	385
<u>hliník</u>	896
<u>platina</u>	133
<u>olovo</u>	129
<u>kyslík</u>	917
<u>cín</u>	227
<u>křemík</u>	703
<u>zlato</u>	129
<u>stříbro</u>	235


## Teplo, tepelné kapacity látek, kalorimetrická rovnice

Tepelná výměna obecně závisí na podmínkách, za kterých probíhá. **Teplo**, které přijme nebo odevzdá plyn, **závisí** na tom, proběhne-li tepelná výměna při *konstantním tlaku* plynu nebo při *konstantním objemu* plynu.

Tomu odpovídají dvě měrné (resp. molární) tepelné kapacity plynů, a to *měrná* (resp. molární) *tepelná kapacita při stálém tlaku*  $c_p$  (resp.  $C_{mp}$ ) a *měrná* (resp. molární) *tepelná kapacita při stálém objemu*  $c_v$  (resp.  $C_{mV}$ ).

U kapalin a pevných látek jsou tyto rozdíly pro běžné výpočty nevýznamné (ale jsou!).

## Kalorimetrická rovnice

- Vložíme do tepelně izolované nádoby s kapalinou teploty  $t_1$  těleso teploty  $t_2 > t_1$ ,  
tepelná výměna  rovnovážný stav
- teploty vyrovnají na společnou teplotu  $t$ ,
- soustava je izolovaná, bude teplo  $Q_2 = m_2 c_2 (t_2 - t)$ , které odevzdá těleso,
- rovno teplo  $Q_1 = m_1 c_1 (t - t_1)$ , které přijme kapalina v nádobě.

- Proto platí tzv. *kalorimetrická rovnice*

$$m_1 c_1 (t - t_1) = m_2 c_2 (t_2 - t)$$

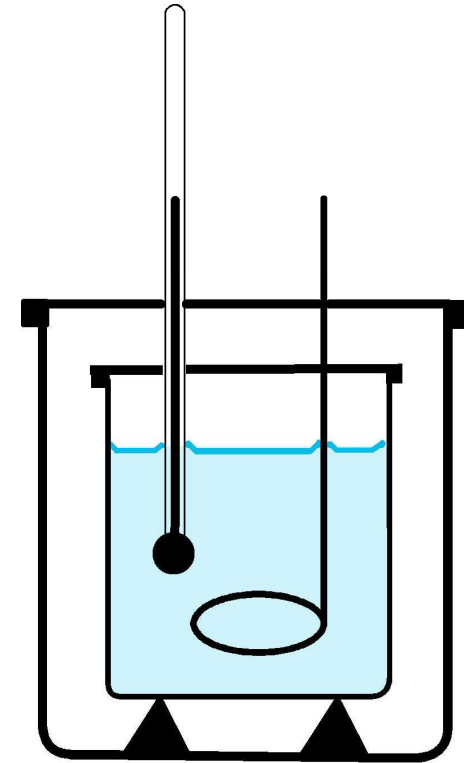
- Pozn. Látky spolu nebudou chemicky reagovat a nedojde ke změně jejich skupenství.

# Kalorimetrická rovnice

## *Kalorimetr*

Tepelná kapacita nádoby kalorimetru, míchačky a teploměru je tepelná *kapacita kalorimetru*  $C_k$ .

$$m_1 c_1 (t - t_1) + C_k (t - t_1) = m_2 c_2 (t_2 - t)$$



## Změny skupenství látky

**Fáze** - soustava v rovnovážném stavu ve všech částech stejné fyzikální a chemické vlastnosti:

- pevná rtuť, kapalná rtuť, rtuťové páry
- diamant, grafit – jsou dvě fáze pevného uhlíku = různé krystalové modifikace téže pevné látky.

Fáze látky je obecnějším pojmem než skupenství látky.

Zkoumaná termodynamická soustava může obsahovat i **větší počet fází**.

Počet stavových veličin, které můžeme libovolně měnit, aniž by se porušil rovnovážný stav soustavy, se nazývá **počet stupňů volnosti** soustavy.

## Změny skupenství látky

**Složka** je každá chemicky čistá látka v soustavě. Má 2 stupně volnosti ( $p$ ,  $T$ ).

*Počet stupňů volnosti* závisí na *počtu složek* tvořících soustavu a na *počtu fází* existujících v soustavě vedle sebe.

### **Gibbsův zákon fází**

**V rovnovážném stavu soustavy platí rovnice  $f + v = s + 2$ , kde  $f$  je počet fází v soustavě a  $s$  je počet složek v soustavě.**

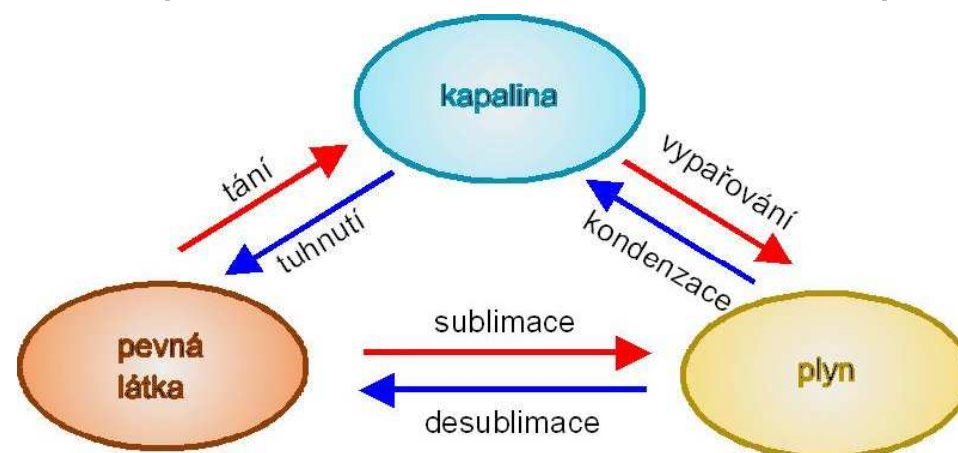
## Změny skupenství látky

Přechod látky z jedné fáze do druhé nazýváme *fázová změna*.  
(led – voda, grafit – diamant)

Přechod látky z jednoho skupenství do druhého skupenství nazýváme *změna skupenství*.

*Fázové změny prvního druhu* - dochází k pohlcování nebo uvolňování tepla, přitom se objem mění skokem.

- **tání, tuhnutí**
- **vypařování, kondenzace**
- **sublimace a desublimace**



## Změny skupenství látky

Těleso o hmotnosti  $m$  při změně skupenství přijme nebo odevzdá **skupenské teplo  $L$**  (tání, vypařování, sublimační).

Skupenské teplo vztažené na 1 kg látky je **měrné skupenské teplo ( $1 \text{ J.kg}^{-1}$ )**.

### a) tání a tuhnutí

Dodané teplo potřebné pro změnu pevného tělesa o **hmotnosti  $m$**  zahřátého na teplotu tání na kapalinu téže teploty je **skupenské teplo tání  $L_t$** .

**Měrné skupenské teplo tání  $l_t$**  je tepelnou konstantou látek.

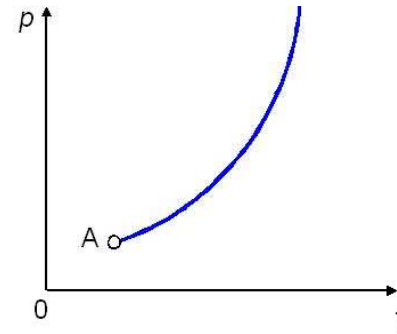
Např. pro led je  $l_t = 334 \text{ kJ.kg}^{-1}$ .

Při teplotě tuhnutí, která je rovna teplotě tání, kapalina se mění v pevné těleso – tuhne. Při tom odevzdá svému okolí **skupenské teplo tuhnutí** rovné  $L_t$ .

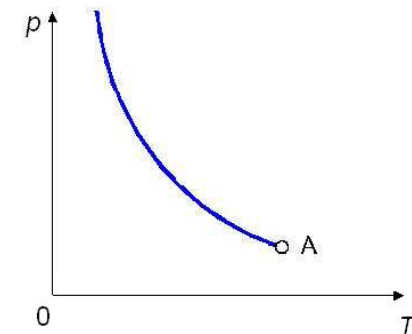
Pevné amorfní látky při zahřívání postupně měknou, až se přemění v kapalinu. Nemají proto určitou teplotu tání.



## Změny skupenství látky

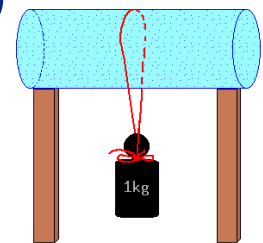


a



b

- Teploty tání krystalické látky u většiny látek (např. Pb) rostou při zvýšení tlaku. **Při tání zvětšují svůj objem.**
- Některé látky (např. led, Sb, Bi a některé slitiny) mají naopak s rostoucím vnějším tlakem teplotu tání nižší, než měly před zvýšením tlaku. **Při tání zmenšují svůj objem a při tuhnutí zvětšují svůj objem. (Regelace ledu)**
- Každý bod *křivky tání* znázorňuje rovnovážný stav pevné a kapalné fáze určité látky (křivka tání patří mezi rovnovážné křivky).
- Křivka tání začíná v bodě A, kterému odpovídá nejmenší možný tlak, při kterém jsou kapalina a pevná látka ještě v rovnováze.
- Protože teploty tání různých látek závisí na tlaku, udávají se v tabulkách za normálního tlaku a nazývají se *normální teploty tání*.



## Změny skupenství látky

### b) Sublimace a desublimace

*Sublimace* = přeměna látky z pevného skupenství přímo ve skupenství plynné. Opačný děj je *desublimace*.

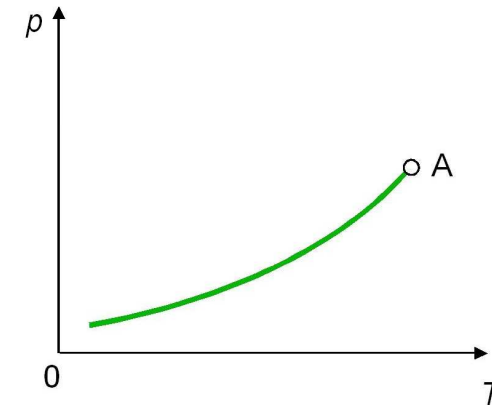
Za normálního tlaku sublimuje např. jod, naftalen, pevný oxid uhličitý = suchý led, led nebo sníh.

*Skupenské teplo sublimace*  $L_s$  je teplo přijaté látkou o hmotnosti  $m$  při její sublimaci za dané teploty. Měrné skupenské teplo sublimace závisí na teplotě.

*Měrné skupenské teplo sublimace*  $l_s = L_s / m$

Např. pro led  $H_2O$  je při teplotě  $0\text{ °C}$   $l_s = 2,83\text{ MJ.kg}^{-1}$ .

## Změny skupenství látky



Sublimující látka dostatečné hmotnosti v uzavřené nádobě sublimuje tak dlouho, až se vytvoří *rovnovážný stav mezi pevnou fází a párou*. Takováto pára se nazývá **sytá pára**.

Nemění-li se teplota, zůstává konstantní poměr hmotností plynné a pevné fáze a nemění se tlak syté páry vzniklé sublimací.

Grafické znázornění závislosti tlaku syté páry na teplotě je *sublimační křivka*.

Každý bod sublimační křivky znázorňuje *rovnovážný stav mezi pevnou látkou a její sytou párou*.

Sublimační křivka končí v bodě A, ve kterém začíná křivka tání pro tutéž látku.

## Změny skupenství látky

### c) Vypařování a var, kondenzace

**Vypařování** je děj přeměny kapaliny v páru. Na rozdíl od tání probíhá vypařování z **volného povrchu kapaliny** za každé teploty.

Na přeměnu kapaliny o hmotnosti  $m$  v páru téže teploty je třeba dodat *skupenské teplo vypařování*  $L_v$ .

*Měrné skupenské teplo vypařování*  $l_v = L_v / m$

Měrné skupenské teplo vypařování klesá s rostoucí teplotou.

Např. pro vodu teploty  $0\text{ °C}$  je  $2,51\text{ MJ.kg}^{-1}$ , pro vodu teploty  $100\text{ °C}$  je  $2,26\text{ MJ.kg}^{-1}$  (za normálního tlaku).

## Změny skupenství látky

Zvláštním případem vypařování kapaliny je **var**.

Na rozdíl od vypařování se kapalina při varu **vypařuje nejen na volném povrchu, ale také uvnitř - vznik bublinek**).

(Při dosažení určité teploty při daném okolním tlaku se uvnitř kapaliny vytvářejí bubliny páry, které zvětšují svůj objem a vystupují k volnému povrchu kapaliny).



Teplota  $t_v$ , při které za daného vnějšího tlaku nastává var kapaliny, se nazývá **teplota varu**.

S rostoucím tlakem se teplota varu zvětšuje.

V tabulkách se uvádí teplota varu za normálního tlaku – normální teplota varu.

**Měrné skupenské teplo varu** se rovná měrnému skupenskému teplu vypařování při teplotě varu kapaliny.



## Změny skupenství látky



Obrácený děj k vypařování je **kondenzace**.

- Při tomto ději látka odevzdá svému okolí skupenské teplo kondenzační.
- Měrné skupenské teplo kondenzační je rovno měrnému skupenskému teplu vypařování téže látky při téže teplotě.
- Kondenzace může nastat na povrchu kapaliny, pevné látky nebo i ve volném prostoru (orosené zrcadlo, mžení...)
- Při tomto ději dochází k spojování několika molekul páry v drobné kapičky, které pak postupně rostou. Vytváření těchto kapiček usnadňují drobná zrnka prachu nebo elektricky nabitě částice = **kondenzační jádra**.

## Změny skupenství látky

Kapalina v uzavřené nádobě se **vypařuje tak dlouho až nastane rovnovážný stav mezi kapalinou a její párou.**

V tomto rovnovážném stavu se objemy kapaliny a páry nemění, konstantní zůstává také tlak páry a teplota soustavy kapalina + pára.

Pára, která je v rovnovážném stavu se svou kapalinou, se nazývá **sytá pára**.

V uzavřené nádobě za přítomnosti kapaliny je vždy sytá pára.

Tlak syté páry nezávisí při stálé teplotě na objemu páry.

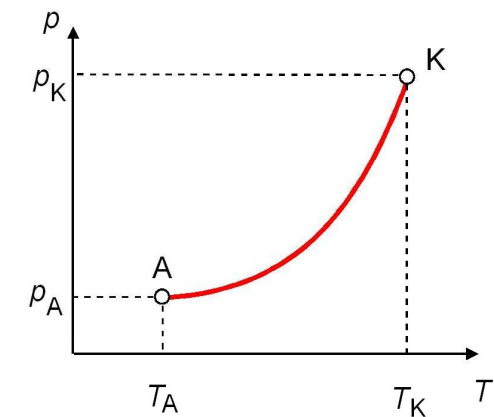
Protože tlak syté páry za dané teploty nezávisí na objemu( při zvětšení objemu prostoru nad kapalinou se vypaří další část kapaliny), neplatí pro sytou páru zákon Boyleův-Mariottův a stavová rovnice a sytá pára se tím podstatně liší od ideálního plynu.

**Sytá pára**

- atomy páry se vrací zpět do kapaliny – kondenzují
- 1. vypařování převládá, 2. vyrovnání, 3. úplně nasycená pára = sytá pára

- dynamická rovnováha – oba děje najednou ve stejném množství.

## Změny skupenství látky



Zvýšíme-li teplotu soustavy kapalina a její sytá pára, tlak syté páry nad kapalinou vzroste - *křivka syté páry*.

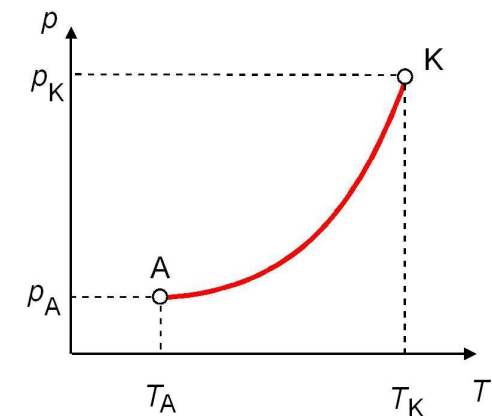
Každý bod křivky syté páry odpovídá rovnovážnému stavu soustavy kapalina a její sytá pára.

- Křivka začíná v bodě A, který reprezentuje nejmenší hodnotu tlaku a teploty, při kterých existuje kapalina a její sytá pára v rovnovážném stavu.
- Bodem A začíná také křivka tání a končí jím sublimační křivka.

Např. pro  $H_2O$  je v bodě A termodynamická teplota 273,16 K a tlak asi  $6,1 \cdot 10^2$  Pa = trojný bod vody.



## Změny skupenství látky



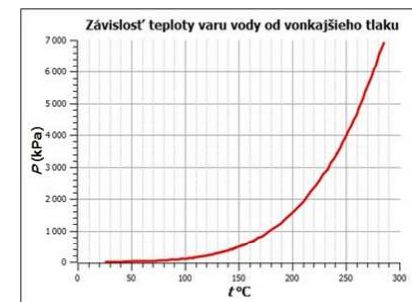
S růstem teploty rovnovážné soustavy kapalina + sytá pára roste hustota syté páry a hustota kapaliny naopak klesá.

- Při určité, tzv. **kritické teplotě**  $T_k$  je hustota kapaliny rovna hustotě páry. Mezi kapalinou a její sytou párou mizí rozhraní a látka se stává stejnorodou.
- Při vyšší teplotě než  $T_k$  už neexistuje látka v kapalně fázi. Proto křivka syté páry končí v bodě K. Tento bod křivky syté páry se nazývá **kritický bod** a znázorňuje kritický stav látky.
- **Kritický stav** je určen **kritickou teplotou**  $T_k$ , **kritickým tlakem**  $p_k$  a **kritickou hustotou**  $\rho_k$ .

Tabulky. např. pro  $H_2O$   $T_k = 647,3$  K ( $374,15$  °C),  $p_k = 22,13$  MPa a  $\rho_k = 315$  kg.m<sup>-3</sup>.

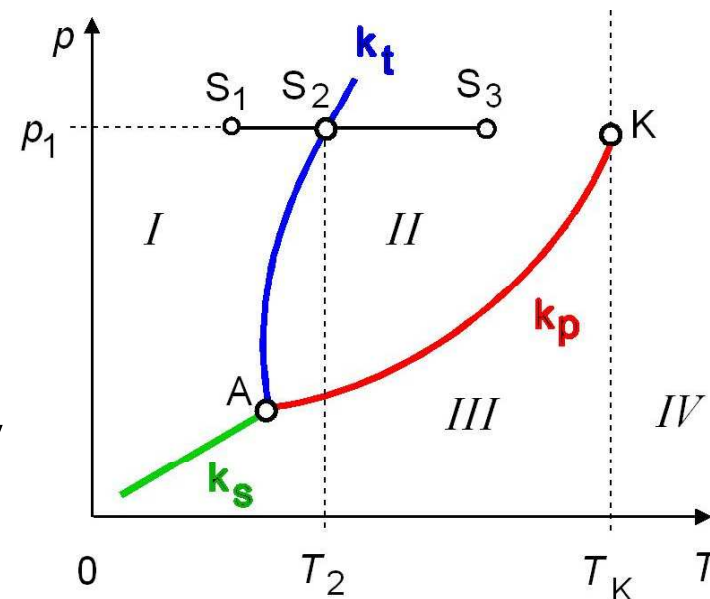
Z křivky syté páry je možno stanovit teplotu varu při daném vnějším tlaku.

Aby bubliny syté páry, které se vytvoří v objemu kapaliny, vystoupily na volný povrch kapaliny, musí být tlak syté páry roven vnějšmu tlaku.



## Změny skupenství látky

**Fázový diagram** dané látky znázorňuje rovnovážný stav pevné, kapalně a plynné fáze těžé látky.



Všechny tři křivky (*křivku tání  $k_t$ , sublimační křivku  $k_s$  a křivku syté páry  $k_p$* ) se stýkají v jediném bodě A, který se nazývá **trojný bod**. Znázorňuje rovnovážný stav pevné, kapalně a plynné fáze těžé látky.

Jednotlivé křivky  $k_t$ ,  $k_s$  a  $k_p$  rozdělují rovinu fázového diagramu na tři oblasti podle skupenství:

- I- látka v pevném skupenství
- II- různé stavy kapaliny.
- III- plynné skupenství látky, které má nižší tlak než sytá pára těžé teploty.

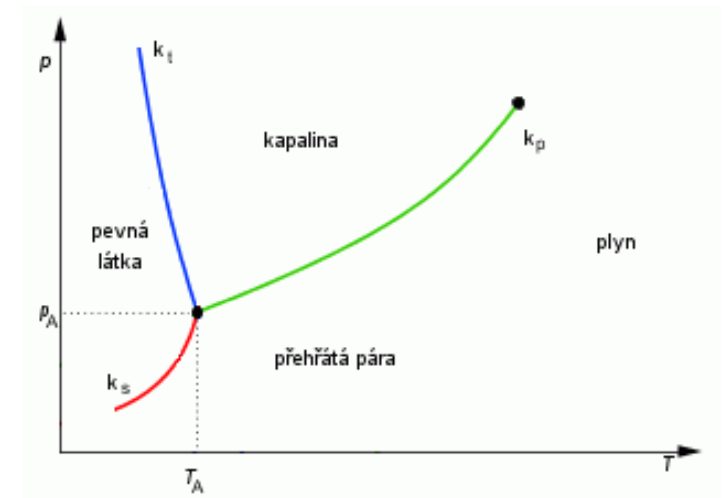
➡ **přehřátá pára**. Přehřátá pára je pára, která má nižší tlak a hustotu než sytá pára těžé teploty (např. zahřívání bez přítomnosti kapaliny).

## Změny skupenství látky

Oblast IV znázorňuje stavy plynného skupenství látky pro teploty vyšší než je kritická teplota.

Toto plynné skupenství stručně nazýváme **plyn**.

Má-li být plyn zkapalněn, je třeba ho ochladit před kompresí pod kritickou teplotu).



# Vnitřní energie termodynamické soustavy, práce a teplo

Každé látkové těleso má energii, která souvisí s jeho vnitřní částicovou strukturou. Tuto energii nazýváme ***vnitřní energií tělesa*** (soustavy).

- Částice látky (molekuly, atomy, ionty) konají neustálý a neuspořádaný pohyb (posuvný, otáčivý, kmitavý).
- Celková kinetická energie všech neuspořádaně se pohybujících částic látky je jednou složkou vnitřní energie tělesa (soustavy).
- Částice látky na sebe navzájem působí silami, a mají proto potenciální energii.
- Celková potenciální energie všech částic závisící na jejich vzájemné poloze je další složkou vnitřní energie tělesa (soustavy).

Dalšími složkami jsou zejména potenciální a kinetická energie kmitajících atomů, ze kterých se skládají molekuly, a vnitřní energie atomů (energie elektronů v elektronovém obalu, energie jádra atomu atd.)

# Vnitřní energie termodynamické soustavy, práce a teplo

**Vnitřní energii  $U$  tělesa (soustavy) budeme tedy definovat jako součet celkové kinetické energie neuspořádaně se pohybujících částic tělesa a celkové potenciální energie vzájemné polohy těchto částic.**

Děje, při nichž se mění vnitřní energie tělesa, lze rozdělit do tří skupin:

a) děje, při kterých se mění vnitřní energie konáním práce

Například při tření dvou těles, při stlačení plynu v tepelně izolované nádobě, při zahřívání kapaliny prudkým mícháním, při ohýbání drátu, při nepružném nárazu tělesa na podložku.

b) děje, při nichž nastává změna vnitřní energie tepelnou výměnou

Zahřívání, ochlazování.

c) děje, při kterých se vnitřní energie mění oběma způsoby.

**Jestliže děj bude probíhat v izolované soustavě, zůstává součet kinetické, potenciální a vnitřní energie těles konstantní.**

# Vnitřní energie termodynamické soustavy, práce a teplo

Vztah mezi veličinami  $A'$ ,  $\Delta U$  a  $Q$  vyjadřuje **první termodynamický zákon (1.VT)**:

**Přírůstek vnitřní energie soustavy  $\Delta U$  se rovná součtu práce  $A'$  vykonané okolními tělesy působícími na soustavu silami a tepla  $Q$  odevzdaného okolními tělesy soustavě.**

$$\Delta U = A' + Q$$

$$dU = \delta A' + \delta Q$$

Vnitřní energie  $U$  je tak zvanou stavovou funkcí. To znamená, že její změna  $dU$  závisí po proběhnutí určité změny stavu soustavy (děje) jen na hodnotách stavových veličin v počátečním a konečném stavu soustavy (na začátku a na konci děje) a nezávisí na druhu stavové změny (děje), tj. je úplný (totální) diferenciál. Teplo a práce nejsou stavové funkce a jejich diferenciály nejsou v obecném případě úplné.

# Vnitřní energie termodynamické soustavy, práce a teplo

Vztah mezi veličinami  $A'$ ,  $\Delta U$  a  $Q$  vyjadřuje **první termodynamický zákon (1.VT)**:

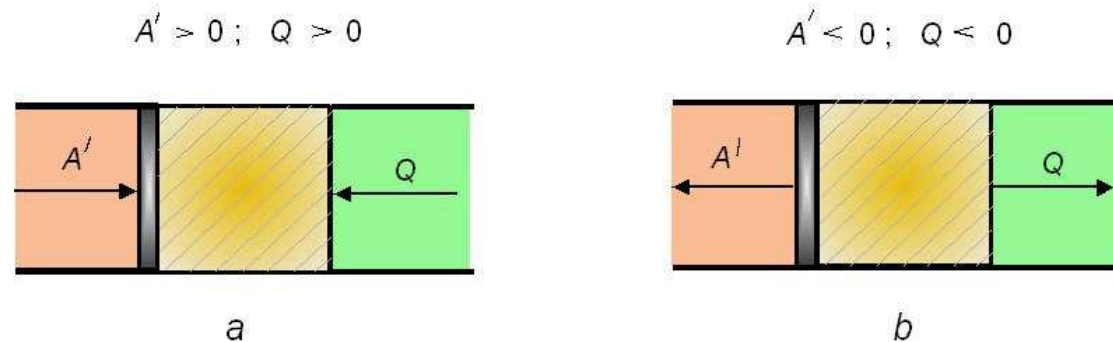
**Není možné sestavit stroj, který by trvale anebo po jistou dobu vykonával práci, aniž by se změnila jeho energie nebo energie jeho okolí.**

~~Perpetuum mobile 1. druhu~~

$$\delta A = \delta Q - dU$$

Pokud nebude dodáno žádné teplo  $Q$ , po jisté době se vnitřní energie  $U$  vyčerpá.

# Vnitřní energie termodynamické soustavy, práce a teplo



- Jestliže konáním práce nebo tepelnou výměnou soustava přijímá energii, považujeme práci vykonanou okolními tělesy za kladnou veličinu  $A' > 0$  (práce konaná soustavou je  $A < 0$ , tj. soustava práci spotřebovává) a teplo přijaté soustavou rovněž za kladné  $Q > 0$ .
- Jestliže soustava konáním práce nebo tepelnou výměnou odevzdává energii okolním tělesům, je  $A' < 0$ ,  $A > 0$ ,  $Q < 0$ .
- Změna vnitřní energie soustavy je kladná  $\Delta U > 0$ , jestliže se vnitřní energie soustavy zvětšila. V opačném případě je změna vnitřní energie záporná  $\Delta U < 0$ .



## Ideální plyn, stavová rovnice

**Ideální plyn.** Vlastnosti molekul plynu v tomto modelu jsou:

1. Rozměry molekul jsou ve srovnání se střední vzdáleností molekul od sebe zanedbatelně malé (tj. zanedbáváme vlastní objem molekul).
2. Molekuly nepůsobí na sebe navzájem přitažlivými silami (zanedbáváme síly interakce mezi molekulami plynu).
3. Vzájemné srážky molekul a srážky molekul se stěnami nádoby jsou dokonale pružné (při srážkách platí ZZH a ZZE).
4. Protože doba trvání srážky molekul je ve srovnání se střední dobou volného pohybu molekul zanedbatelná, pohybuje se v určitém okamžiku převážná část molekul rovnoměrným přímočarým pohybem.
5. Pohyb molekul je dokonale neuspořádaný (tj. všechny směry pohybu molekuly jsou stejně pravděpodobné).

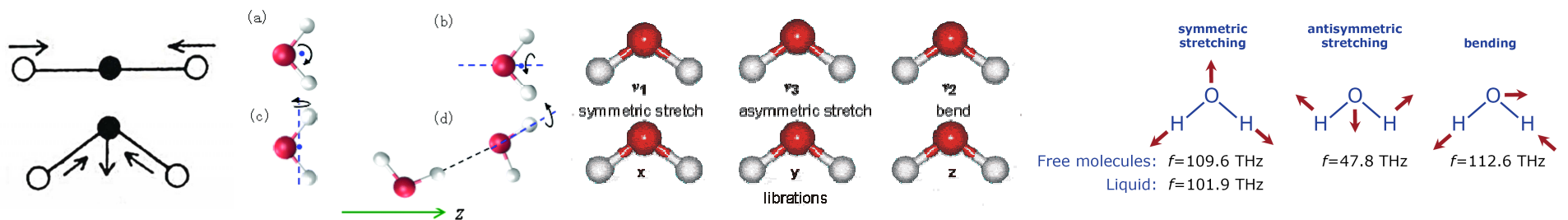
Při dostatečně vysokých teplotách a nízkých tlacích se skutečné plyny svými vlastnostmi přibližují vlastnostem modelu ideálního plynu.

# Ideální plyn, stavová rovnice

Molekuly ideálního plynu **nepůsobí** na sebe navzájem silami, je potenciální energie soustavy molekul ideálního plynu **nulová**.

*Vnitřní energie* ideálního plynu

1. s jednoatomovými molekulami se rovná součtu *kinetických energií* jeho molekul pohybujících se neuspořádaným posuvným pohybem,
2. - s víceatomovými molekulami pak kromě toho zahrnuje *kinetickou energii rotačního a kmitavého pohybu* těchto molekul.).



## Ideální plyn, stavová rovnice

Molekuly plynu  nemají v určitém okamžiku stejnou rychlost.

Vzájemnými srážkami molekul se neustále **mění velikost** a **směr** jejich rychlosti.

Velikosti rychlosti molekul jsou v intervalu od nulových až po velmi velké (teoreticky nekonečně velké).

*Četnost velikostí rychlosti* však v soustavě molekul plynu **není stejná**,



odpovídají určitému ***statistickému rozdělení***.

Chování velkého počtu částic se vyšetřuje metodami ***matematické statistiky***.

## Ideální plyn, stavová rovnice

Pro popis rozdělení molekul ideálního plynu podle rychlostí se zavádí **rozdělovací funkce  $f(v)$** .

Hodnoty této funkce pro danou **rychlost  $v$**  jsou relativní počty molekul, jejichž rychlosti jsou z diferenciálně malého intervalu rychlostí  $(v, v + dv)$ , což se dá zapsat vztahem

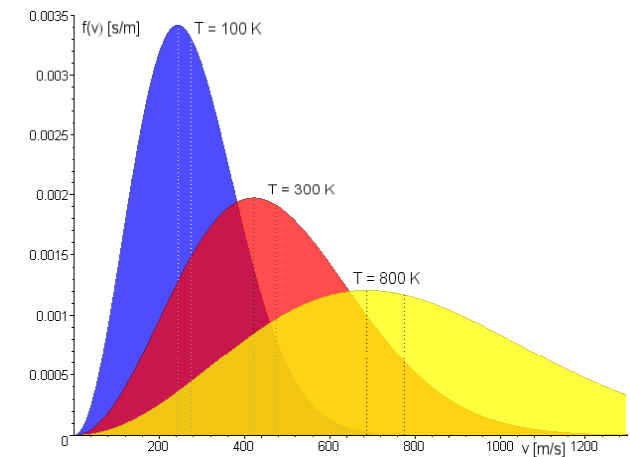
$$f(v) = \frac{dN}{N} \frac{1}{dv}$$

kde  $N$  je celkový počet molekul plynu v soustavě a  $dN$  je počet molekul s rychlostmi v intervalu  $(v, v + dv)$

## Ideální plyn, stavová rovnice

**Maxwellova – Boltzmannova rozdělovací funkce.**

Tato funkce má tvar  $f(v) = Av^2 e^{-\frac{E}{kT}}$



## Ideální plyn, stavová rovnice

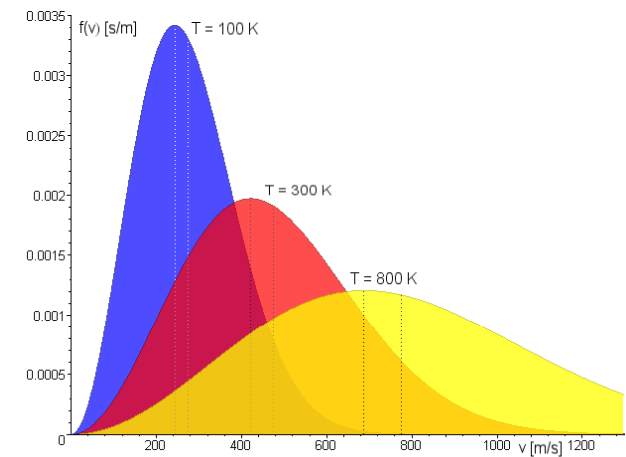
Největší význam má veličina, která se nazývá **střední kvadratická rychlost  $v_k$** .

**Střední kvadratická rychlost** je rychlost, se kterou by se pohybovaly **všechny** molekuly plynu v soustavě, aby celková kinetická energie byla stejná jako kinetická energie soustavy molekul, které se pohybují rychlostmi podle daného rozdělení rychlostí.

$$v_k = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$$

kde  $m_0$  je *hmotnost molekuly plynu* a  $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$  je *Boltzmanova konstanta*.

- Střední kvadratická rychlost se s rostoucí teplotou zvětšuje.



## Ideální plyn, stavová rovnice

**Střední kinetická energie  $E_{k0}$** , kterou má molekula ideálního plynu pohybující se posuvným pohybem je  $E_{k0} = \frac{1}{2} mv^2$


Pro střední kinetickou energii pak

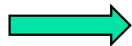
$$E_{k0} = \frac{3}{2} kT$$



## Ideální plyn, stavová rovnice

Kinetická energie molekul plynu může záviset maximálně na šesti parametrech (3 translační, 3 rotační)

**Ekvipartiční teorém**  na každý stupeň volnosti mechannické energie (plynu) připadá stejná energie  $\frac{1}{2} kT$  (pro ideální plyn – 1atomový – 3 stupně volnosti)




$$dU = n \frac{i}{2} R \cdot dT$$



## Ideální plyn, stavová rovnice

**Tlak plynu  $p$**  vysvětlujeme z hlediska molekulové fyziky současnými nárazy molekul plynu na stěny nádoby (dále krychle), ve které je plyn uzavřen.

Molekuly, které dopadají na stěnu se pohybují neuspořádaně, a proto jejich počet i jejich rychlosti se neustále mění  *fluktuace tlaku*.

Odchytky jsou velmi malé a skutečný tlak lze ztotožnit s jeho střední hodnotou  $p_s = p$ .

Každá molekula, která se od plochy o obsahu  $S$  pružně odrazí, změní svojí hybnost  $\vec{p}_2 - \vec{p}_1 = -2\vec{p}_1 = -2m_0\vec{v}$   
Za dobu  $\tau$  dopadne na 1 stěnu krychle  $\frac{1}{6}N_v v \tau S$  molekul. Kde  $N_v = N/V$ .

Velikost celkové změny hybnosti všech molekul, které se za dobu  $\tau$  odrazí od plochy o obsahu  $S$  je  $|\Delta p| = 2m_0 v \cdot \frac{1}{6} N_v v \tau S$ .

Při velkém počtu dopadajících molekul se nárazy jeví tak, jako by na plochu o obsahu  $S$  působila po

dobu  $\tau$  stálá síla o velikosti  $F = \frac{|\Delta p|}{\tau} = \frac{1}{3} m_0 v^2 N_v S$ . Druhou mocninu rychlosti musíme nahradit aritmetickým průměrem druhých mocnin rychlostí všech molekul, tj. druhou mocninou střední kvadratické rychlosti.

**Základní rovnice pro tlak ideálního plynu**

$$p = \frac{1}{3} \frac{N}{V} m_0 v_k^2$$

## Ideální plyn, stavová rovnice

Plyn, který je v rovnovážném stavu, lze charakterizovat stavovými veličinami *termodynamickou teplotou  $T$ , tlakem  $p$ , objemem  $V$  a počtem molekul  $N$*  (nebo odpovídajícími veličinami – *hmotností plynu  $m$  nebo látkovým množstvím  $n$* ).



$$p = \frac{1}{3} \frac{N}{V} m_0 v_k^2 = \frac{1}{3} \frac{N}{V} \frac{m_0 3kT}{m_0} = \frac{1}{V} NkT \quad pV = NkT$$

$$pV = nN_A kT$$

$$pV = nRT$$

## Ideální plyn, stavová rovnice

Pro dva stavy 1 a 2 pak

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad \frac{pV}{T} = \textit{konst}$$



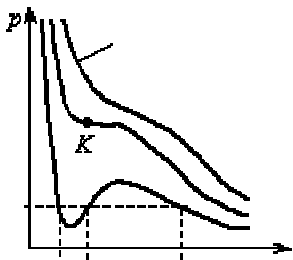
## Ideální plyn, stavová rovnice

Holandský fyzik *van der Waals* upravil stavovou rovnici pro reálný plyn, která lépe vyjadřoval vlastnosti plynu.

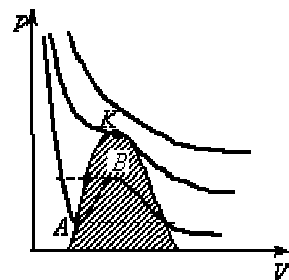
V tomto modelu předpokládal, že molekuly plynu mají vlastní objem a působí na sebe navzájem přitažlivými silami.

Van der Waalsova stavová rovnice pro plyn o látkovém množství  $n$  má tvar kde  $a$  a  $b$  jsou konstanty závislé na druhu plynu.

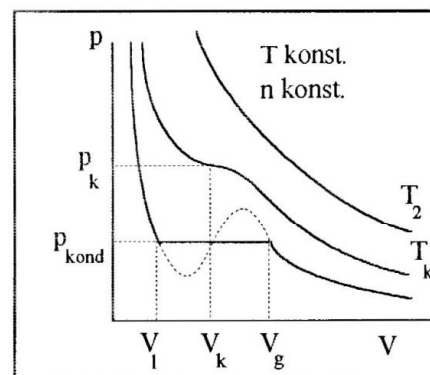
$$\left(p + n^2 \frac{a}{V^2}\right) (V - n \cdot b) = n \cdot R \cdot T$$



Obr. 7.1.9 p-V diagram reálného plynu



Obr. 7.1.10 Nestabilní oblast

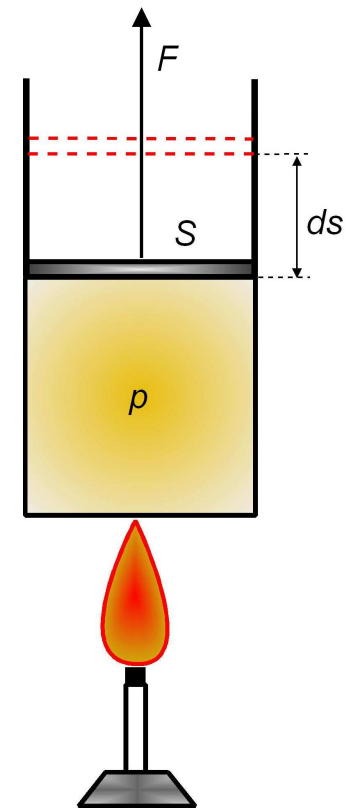


Je-li teplota nižší, než je kritická teplota, má křivka lokální maximum a lokální minimum. U reálných plynů zmenšováním objemu pod  $V_g$  plyn začne kapalnět a tlak se nemění, dokud všechen plyn nezkapalní.

## Práce plynu

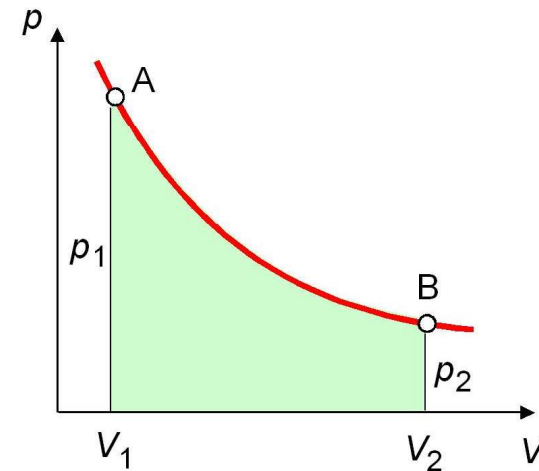
Plyn je pod *tlakem*  $p$  a na píst *plochy*  $S$  působí *tlakovou silou*  $F$ . Při zvětšování objemu bude konat práci:

$$dA = F \cdot ds = p \cdot S \cdot ds = p \cdot dV$$



Bude-li  ${}_{12}V_1 < V_2$ , je  $A > 0$  a plyn práci koná. Bude-li  ${}_{12}V_1 > V_2$ , je  $A < 0$  a plyn práci spotřebovává.

## Stavová rovnice, p-V diagram



**Stavovou změnu (děj)** probíhající v plynu můžeme znázornit v **p-V diagramu**,

Děj v plynu je znázorněn křivkou závislosti tlaku plynu na objemu  $p = p(V)$  odpovídající uvažovanému ději od stavu  $(p_1, V_1)$  do stavu  $(p_2, V_2)$

*Práce konaná plynem* je pak úměrná velikosti *obsahu plochy* pod grafem závislosti  $p = p(V)$  a rovnoběžkami s osou  $p$  vedenými hodnotami  $V_1$  a  $V_2$  .

Za *tlak*  $p$  dosazujeme ze stavové rovnice.

## Molární tepelná kapacita

Při tepelné výměně plynu s okolními tělesy záleží na podmínkách, při kterých tepelná výměna probíhá.

$$C_m = \frac{dQ}{n \cdot dT} \quad dQ = dA + dU \quad C_m = \frac{dU + dA}{n \cdot dT}$$

Proto má plyn dvě *molární (měrné) tepelné kapacity*:

**Molární tepelná kapacita** ideálního plynu při **stálém objemu** je

$$C_{mV} = \frac{i}{2} R, \text{ kde } i = 3, 5, 6 \text{ je počet stupňů volnosti molekuly plynu.}$$

**Molární tepelná kapacita** ideálního plynu při **stálém tlaku** je

$$C_{mp} = \frac{i+2}{2} R$$



## Molární tepelná kapacita

- Při  $V = \text{konst.}$  je teplo dáno vztahem
- $Q = n \cdot C_{mV} \cdot \Delta T$                       resp.  $Q = m \cdot c_V \cdot \Delta T$  .
- Pro  $p = \text{konst.}$  je teplo
- $Q = n \cdot C_{mP} \cdot \Delta T$                       resp.  $Q = m \cdot c_P \cdot \Delta T$  .



## Vratné děje v ideálním plynu

**Termodynamický děj** (nebo také stavová změna) je fyzikální děj, při kterém soustava přejde z *daného počátečního stavu časovou posloupností stavů* do *stavu výsledného*

**Vratný děj:** počáteční stav  $\longleftrightarrow$  výsledný stav (rovnovážný děj)

**Nevratný děj:** počáteční stav  $\longrightarrow$  výsledný stav (skutečné děje v přírodě)

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

## Izochorický děj s ideálním plynem

**Izochorický děj** - při stálém objemu plynu ( $V = \text{konst}$ )

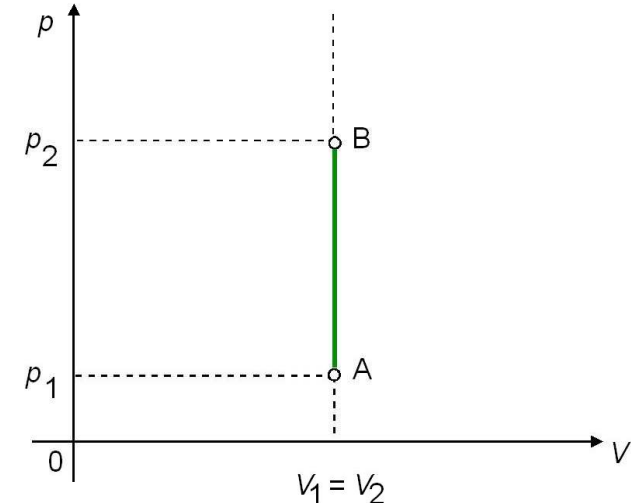
$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad \frac{p}{T} = \text{konst}$$

**Charlesův zákon:** Při izochorickém ději s ideálním plynem stálé hmotnosti je tlak plynu přímo úměrný jeho termodynamické teplotě.

V p-V diagramu: **izochora** ( $V = \text{konst}$ )

$$dA = p \cdot dV = 0 \quad \Delta U = A' + Q_V = Q_V = m \cdot c_v \cdot \Delta T$$

Teplo přijaté ideálním plynem při izochorickém ději se rovná přírůstku jeho vnitřní energie.



$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = nR$$

$$dQ = dA + dU$$

$$C_m = \frac{dU + dA}{n \cdot dT}$$

$$C_m = \frac{dQ}{n \cdot dT}$$

## Izobarický děj s ideálním plynem

**Izobarický děj** - při stálém tlaku plynu ( $p = \text{konst}$ )

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad \frac{V}{T} = \text{konst}$$

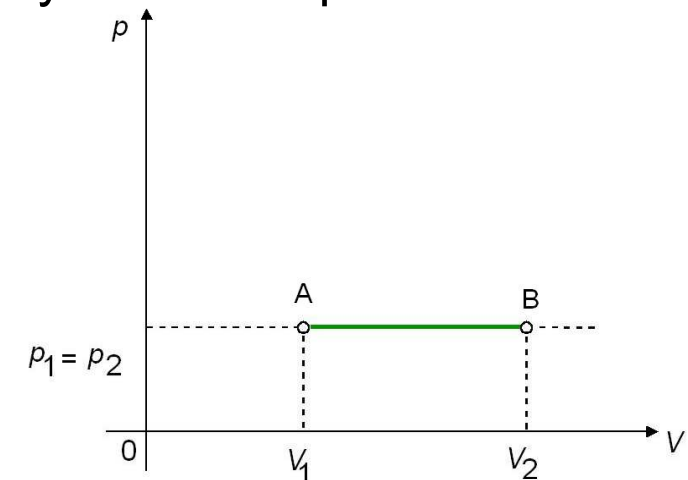
**Gay-Lussacův zákon:** Při izobarickém ději s ideálním plynem stálé hmotnosti je objem plynu přímo úměrný jeho termodynamické teplotě.

V p-V diagramu: **izobara** ( $p = \text{konst}$ )

$$A = p \cdot \Delta V = nR \Delta T$$

$$Q_p = A + \Delta U = m(nR + c_V) \Delta T = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (c_p > c_V)$$

Teplo přijaté ideálním plynem při izobarickém ději se rovná součtu přírůstku jeho vnitřní energie a práci, kterou plyn vykoná.



$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = nR$$

$$dQ = dA + dU$$

$$C_m = \frac{dU + dA}{n \cdot dT}$$

$$C_m = \frac{dQ}{n \cdot dT}$$

## Izotermický děj s ideálním plynem

**Izotermický děj** - při stálé teplotě plynu (  $T = \text{konst}$  )

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

$$pV = \text{konst} = nRT$$

**Boyle-Marriotův zákon:** Při izotermickém ději s ideálním plynem stálé hmotnosti je součin tlaku a objemu plynu stálý.

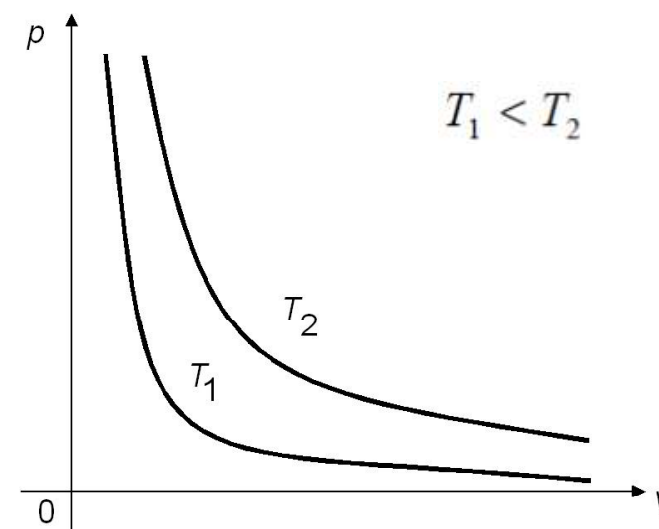
V p-V diagramu: **izoterma**  $(p = \frac{\text{konst}}{V})$

$$\Delta U = mc_V \Delta T = 0$$

$$dA = p \cdot dV = \frac{nRT}{V} dV \quad A = nRT \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

$$Q_T = A + \Delta U = A + 0 = nRT \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

Teplo přijaté ideálním plynem při izotermickém ději se rovná práci, kterou plyn vykoná.



$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = nR$$

$$dQ = dA + dU$$

$$C_m = \frac{dU + dA}{n \cdot dT}$$

$$C_m = \frac{dQ}{n \cdot dT}$$

## Adiabatický děj s ideálním plynem

**Adiabatický děj** - bez tepelné výměny s okolím ( $Q = 0$ )

$$p_1 V_1^\kappa = p_2 V_2^\kappa \quad pV^\kappa = \text{konst} = nRT$$

kde  $\kappa$  je **Poissonova konstanta**. Poissonova konstanta je definována vztahem

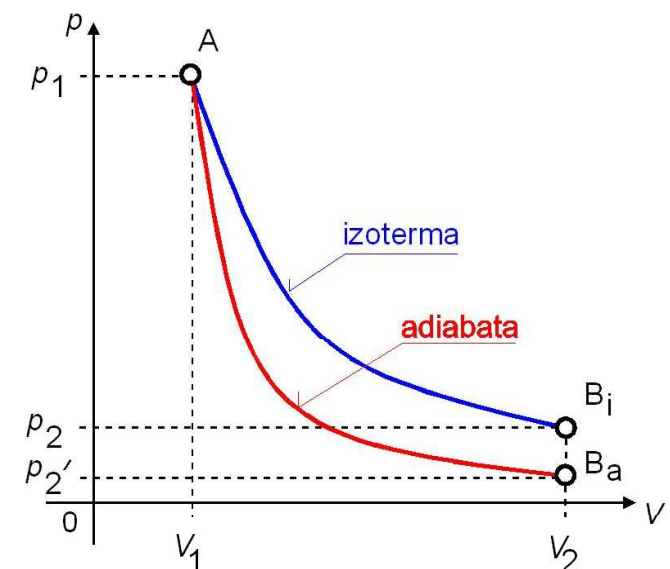
$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} = \frac{i + 2}{i}$$

kde  $i$  je počet stupňů volnosti molekuly ideálního plynu.

V p-V diagramu: **adiabata**  $(p = \frac{\text{konst}}{V^\kappa})$

$$\Delta U = -A = mc_v \Delta T$$

Při adiabatickém stlačení plynu v nádobě konají práci vnější síly, plyn práci spotřebovává a jeho vnitřní energie a teplota se zvětšuje. Při adiabatickém rozpínání koná práci plyn a jeho vnitřní energie a teplota se zmenšuje.



## Adiabatický děj s ideálním plynem

**Adiabatický děj** - bez tepelné výměny s okolím ( $Q = 0$ )

- V technické praxi se dosáhne **adiabatické komprese** nebo **expanze** zmenšením nebo zvětšením objemu plynu **ve velmi krátké době** tak, že plyn během této doby nepřijme ani neodevzdá svému okolí teplo.
- Ochlazení plynu, které provází adiabatickou expanzi, se využívá k získání nízkých teplot.
- U vznětových motorů se při adiabatické kompresi vzduchu zvýší jeho teplota na zápalnou teplotu nafty, která po vstříknutí do horkého vzduchu se vznítí.

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = nR$$

$$dQ = dA + dU$$

$$C_m = \frac{dU + dA}{n \cdot dT}$$

$$C_m = \frac{dQ}{n \cdot dT}$$

## Polytropický děj s ideálním plynem

**Polytropický děj** - nemění se tepelná kapacita plynu ( $C_v = \text{konst}$ )

$$p_1 V_1^\nu = p_2 V_2^\nu \quad pV^\nu = \text{konst}$$

$$TV_1^{\nu-1} = TV_2^{\nu-1} \quad TV^{\nu-1} = \text{konst}$$

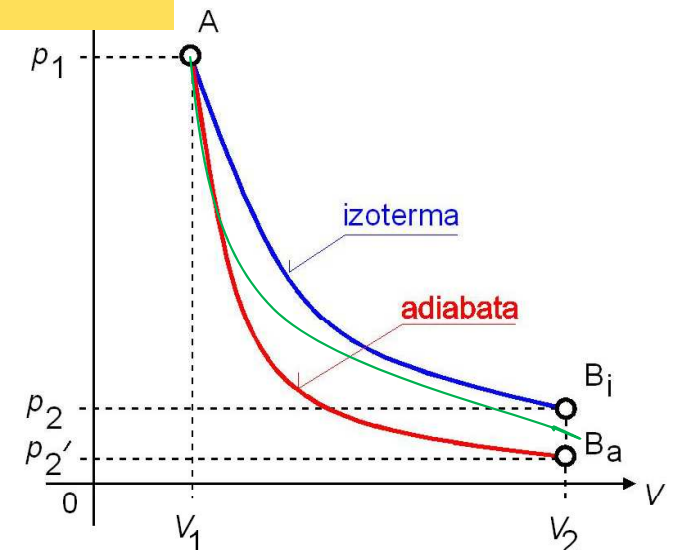
$$p_1^{1-\nu} T_1^\nu = p_2^{1-\nu} T_2^\nu \quad p^{1-\nu} T^\nu = \text{konst}$$

kde  $\nu$  je **polytropický koeficient**.

$$\nu = \frac{C_{mp} - C_{mv}}{C_{mV} - C_{mv}}$$

kde  $C_{mv}$  je molární polytropická tepelná kapacita.

V p-V diagramu: **polytropa** ( $p = \frac{\text{konst}}{V^\nu}$ )



## Kruhový děj s ideálním plynem

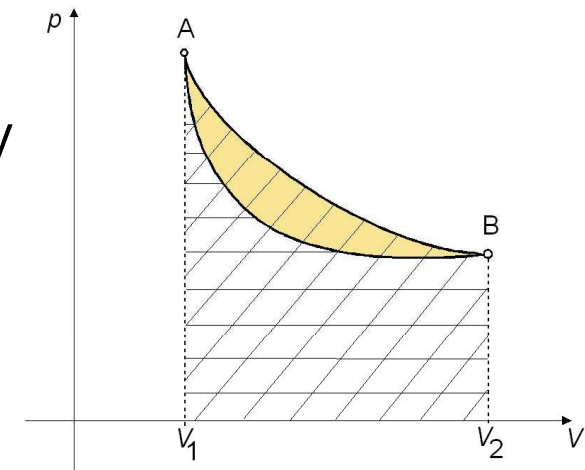
**Kruhový děj** - Termodynamický děj, při kterém je **konečný stav** soustavy totožný s **počátečním stavem** (tj. se stejnou vnitřní energií  $\Delta U = 0$ ).

Grafickým znázorněním kruhového děje ve stavovém diagramu ( p-V, V-T, p-T ) je vždy **uzavřená** křivka.

Práce A je dána obsahem plochy uvnitř uzavřené křivky znázorňující kruhový děj .

$$A = A_1 + A_2, \text{ kde } A_1 > 0 \text{ a } A_2 < 0$$

$$A = A_1 + A_2 = -\Delta U + Q = Q_1 + Q_2 \quad \leftarrow \text{1.VT}$$



kde dodané teplo plynu  $Q_1 > 0$  a odebrané teplo  $Q_2 < 0$  .

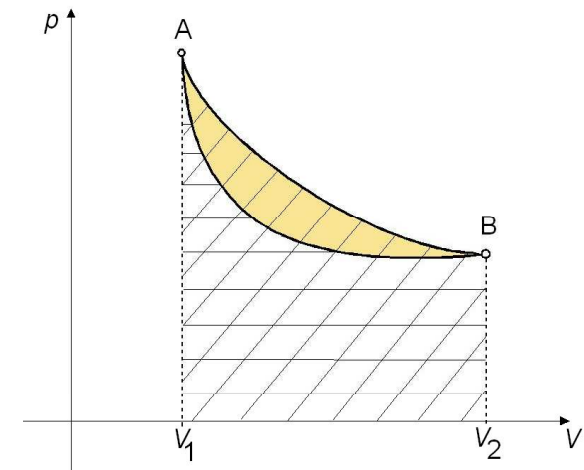
kde  $A_1 > 0$  (plyn pracuje = koná práci, objem se zvětšuje) a  $A_2 < 0$  (objem se zmenšuje).



$$C_m = \frac{dQ}{n \cdot dT}$$

## Kruhový děj s ideálním plynem

■ Těleso, od kterého plyn (pracovní látka) **přijme** během jednoho cyklu kruhového děje *teplo*  $Q_1$ , nazýváme **ohříváč**



$$C_m = \frac{dQ}{n \cdot dT}$$

## Kruhový děj s ideálním plynem

### Carnotův cyklus - 2 izotermny a 2 adiabaty

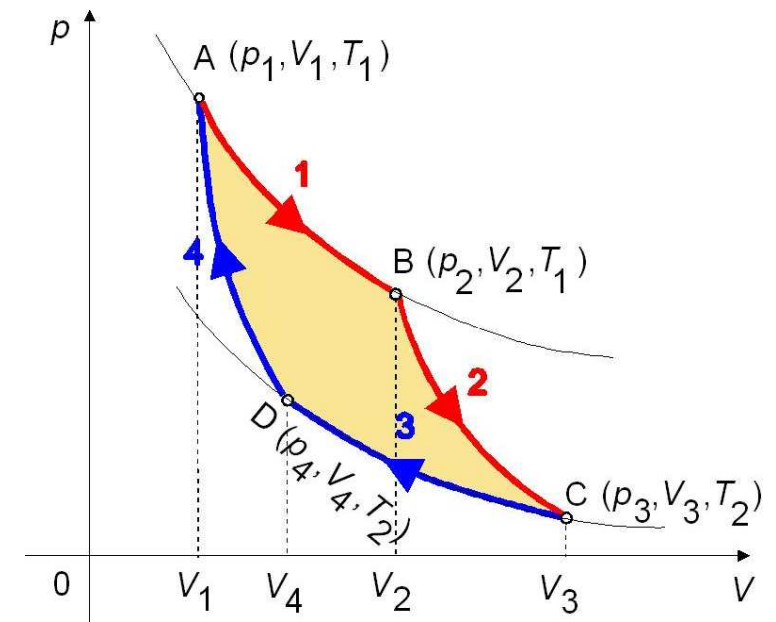
- 1. izotermická expanze (křivka AB)

$$Q_1 = A_1 = n \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} > 0$$

$$Q_2 = 0$$

$$Q_3 = A_3 = n \cdot R \cdot T_2 \cdot \ln \frac{V_4}{V_3} < 0$$

$$Q_4 = 0$$



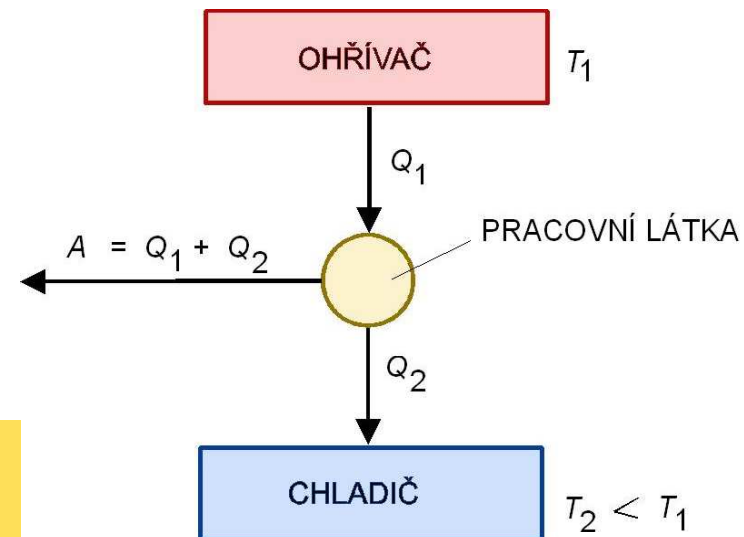
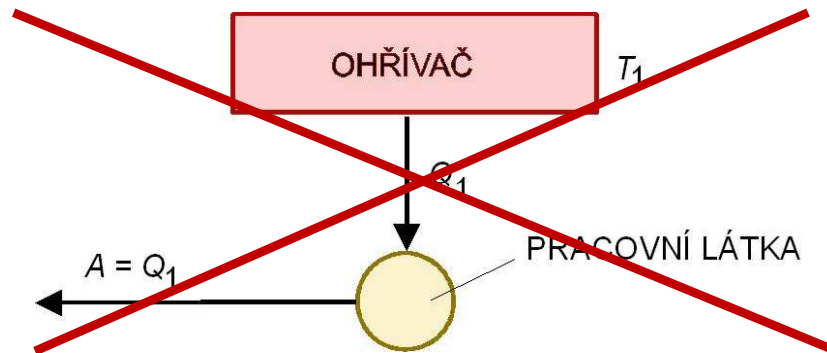
## Kruhový děj s ideálním plynem

Z tepla přijatého od ohřivače lze jen část využít ke konání práce.

Zbytek odevzdává pracovní látka chladiči.

Druhý termodynamický zákon (2.VT): (~~Perpetuum mobile 2. druhu~~)

Není možné sestavit periodicky pracující tepelný stroj, který by jen přijímal teplo od určitého tělesa (ohřivače) a vykonával trvale stejně velkou práci.



Při tepelné výměně teplejší těleso nemůže přijímat teplo od tělesa studenějšího.

## Přenos tepla

**Přenos vnitřní energie** (=přenos tepla) je fyzikální děj, při kterém se část vnitřní energie tělesa (soustavy, části soustavy) přenáší na jiné těleso (soustavu, část soustavy).

- a) tepelnou výměnou vedením
- b) tepelnou výměnou zářením
- c) prouděním.

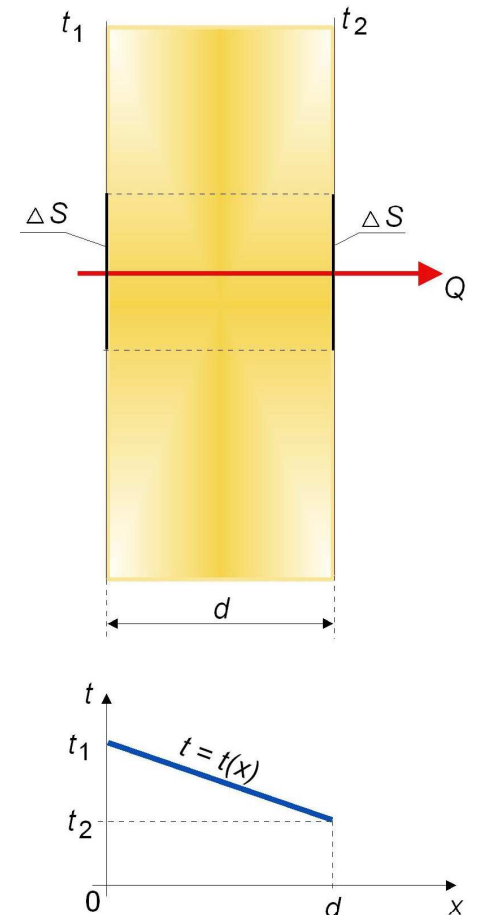
# Přenos tepla

## a) Tepelná výměna vedením

Tepelná výměna vedením (vedení tepla) je děj, při kterém se přenos vnitřní energie v tělese nebo mezi více tělesy, které jsou ve vzájemném styku z míst s vyšší teplotou do míst s nižší teplotou uskutečňuje vzájemnými srážkami částic látky.

Částice, které mají větší kinetickou energii, předávají část této energie částicím s menší kinetickou energií. Těleso (resp. soustava těles), ve kterém probíhá tepelná výměna, zůstává přitom v klidu.

- Jsou-li teploty míst s vyšší a nižší teplotou udržovány neustále na stejných hodnotách  $\longrightarrow$  **ustálené (stacionární) vedení tepla.**
- V opačném případě  $\longrightarrow$  **neustálené (nestacionární) vedení tepla.**



# Přenos tepla

## a) Tepelná výměna vedením

Vlastnost látky umožňující tepelnou výměnu vedením nazýváme **tepelná vodivost** a veličinu, která charakterizuje tepelnou vodivost látky nazýváme **součinitel tepelné vodivosti**  $\lambda$ .  $\lambda_{\text{Cu}} = 400 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ,  $\lambda_{\text{Al}} = 240 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

**Tepelný tok  $\Phi$**  :  $\Phi = \frac{Q}{\Delta\tau}$

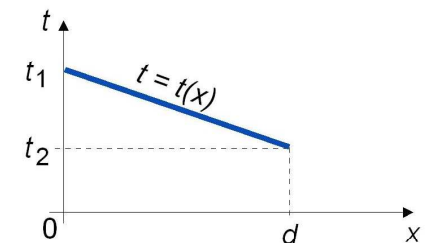
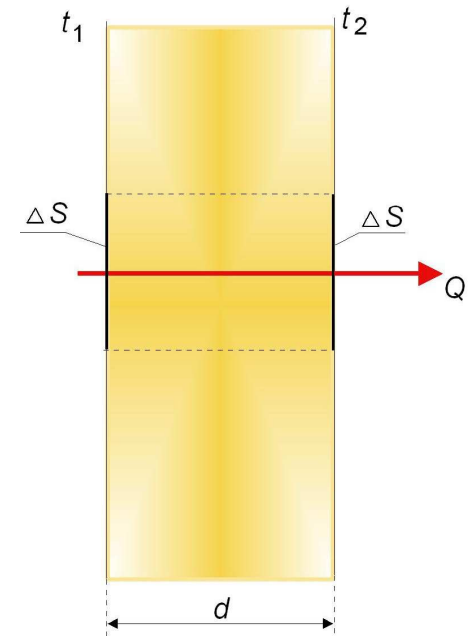
**Hustota tepelného toku  $\varphi$**  :  $\varphi = \frac{\Phi}{\Delta S} = \frac{Q}{\Delta S \cdot \Delta\tau}$

Při ustáleném vedení tepla projde **plochou  $\Delta S$**  desky **tloušťky  $d$**  za **dobu  $\Delta t$**  **teplo  $Q$** , které je přímo úměrné teplotnímu spádu

$$Q = \lambda \cdot \frac{t_1 - t_2}{d} \cdot \Delta S \cdot \Delta\tau$$

← **Fourierův zákon** →

$$\varphi = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx}$$



# Přenos tepla

## a) Tepelná výměna vedením

Vlastnost látky umožňující tepelnou výměnu vedením nazýváme **tepelná vodivost** a veličinu, která charakterizuje tepelnou vodivost látky nazýváme **součinitel tepelné vodivosti**  $\lambda$ .  $\lambda_{\text{Cu}} = 400 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ,  $\lambda_{\text{Al}} = 240 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

**Tepelný tok  $\Phi$**  :  $\Phi = \frac{Q}{\Delta\tau}$

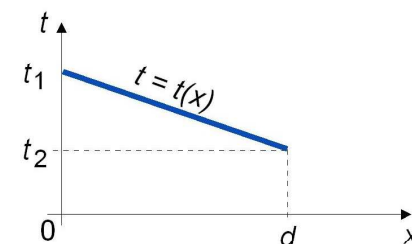
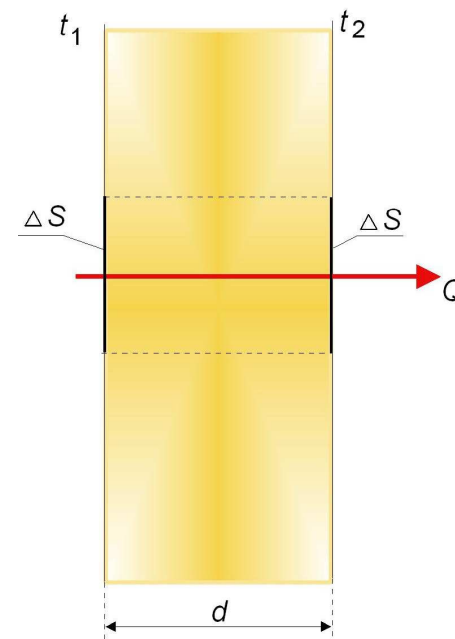
**Hustota tepelného toku  $\varphi$**  :  $\varphi = \frac{\Phi}{\Delta S} = \frac{Q}{\Delta S \cdot \Delta\tau}$

Při ustáleném vedení tepla projde **plochou  $\Delta S$**  desky **tloušťky  $d$**  za **dobu  $\Delta t$**  **teplo  $Q$** , které je přímo úměrné teplotnímu spádu

$$Q = \lambda \cdot \frac{t_1 - t_2}{d} \cdot \Delta S \cdot \Delta\tau$$

← **Fourierův zákon** →

$$\varphi = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx}$$



# Přenos tepla

## a) Tepelná výměna vedením

- Experiment  $\longrightarrow$  podíl součinitele *tepelné vodivosti*  $\lambda$  a *měrné elektrické vodivosti*  $\gamma$  kovů je pro *teplotu*  $T$  pro všechny kovy při nepříliš nízkých teplotách **přibližně stejný a úměrný této teplotě**

- Wiedemannův- Franzův zákon

$$\frac{\lambda}{\gamma} = konst. \cdot T$$

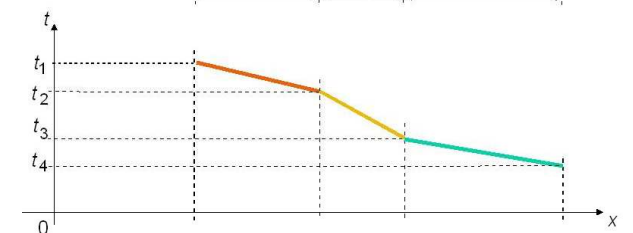
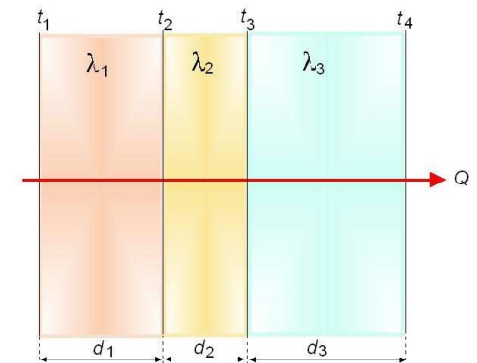
- Elektricky nevodivé látky (izolanty) vedou teplo špatně.

$$\lambda_{\text{PVC}} = 0,12 - 0,16 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}, \quad \lambda_{\text{porcelán}} = 0,86 - 1,86 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1},$$

$$\lambda_{\text{voda}} = 0,2 - 0,6 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}, \quad \lambda_{\text{vzduch}} = 0,023 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

*Tepelný odpor*  $R$  tělesa *tloušťky*  $d$

$$R = \frac{d}{\lambda}$$





# Přenos tepla

## b) Tepelná výměna zářením

Tepelná výměna zářením je děj, při kterém se přenos vnitřní energie z míst s vyšší teplotou do míst s nižší teplotou uskutečňuje prostřednictvím elektromagnetického záření. (bez vzájemného kontaktu)

- emise záření  absorpce záření

*Tepelným zářením* nazýváme obvykle (ne zcela přesně) infračervené záření s vlnovými délkami od asi  $0,78 \mu\text{m}$  do  $360 \mu\text{m}$ .

# Přenos tepla

## b) Tepelná výměna zářením

**Zářivý tok**  $\Phi_e$  definovaný vztahem

$$\Phi_e = \frac{dQ}{d\tau}$$

je výkonem tepelného záření procházejícího danou plochou (jednotkou je 1 W).

Výkon tepelného záření vyzařovaný jednotkovou plochou se **nazývá intenzita vyzařování**  $M_e$  Jednotkou je 1 W.m<sup>-2</sup>.

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS}$$

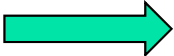

- Dopadá-li na povrch tělesa zářivý tok  $\Phi_e$ , část zářivého toku  $\Phi_{e\rho}$  se od povrchu tělesa odráží, část  $\Phi_{e\tau}$  tělesem projde a část  $\Phi_{e\alpha}$  se tělesem pohltí.

- ZZE: 
$$\frac{\Phi_{e\rho}}{\Phi_e} + \frac{\Phi_{e\tau}}{\Phi_e} + \frac{\Phi_{e\alpha}}{\Phi_e} = 1$$

# Přenos tepla

## b) Tepelná výměna zářením

- ZZE: 
$$\frac{\Phi_{e\rho}}{\Phi_e} + \frac{\Phi_{e\tau}}{\Phi_e} + \frac{\Phi_{e\alpha}}{\Phi_e} = 1$$

- $\rho$  *odrazivost* tepelného záření  $\rho = \frac{\Phi_{e\rho}}{\Phi_e}$
- $\tau$  *propustnost* tepelného záření  $\tau = \frac{\Phi_{e\tau}}{\Phi_e}$
- $\alpha$  *pohltivost* tepelného záření  $\alpha = \frac{\Phi_{e\alpha}}{\Phi_e}$
- Je-li  $\alpha = 1$  a  $\rho = \tau = 0$   **černé těleso.**
- Je-li  $\rho = 1$  a  $\alpha = \tau = 0$   **bílé těleso.**
- Je-li  $\tau = 1$  a  $\alpha = \rho = 0$  je těleso **dokonale propustné** (průteplivé).


# Přenos tepla

## b) Tepelná výměna zářením

- Černé těleso ( $\alpha = 1$ ) je idealizovaným modelem
- Pro vyzařování černého tělesa platí *Stefanův-Boltzmannův zákon*:

$$M_{e0} = \sigma \cdot T^4$$

kde konstanta úměrnosti  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$  je Stefanova-Boltzmannova konstanta.

- **Šedé těleso**  pohltivost  $\alpha < 1$  **je stejná** pro všechny vlnové délky záření (tj. **nezávisí na vlnové délce**).
- Stefanův-Boltzmannův zákon pro šedé těleso:

$$M_e = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

kde  $\varepsilon$  je **emisivita** tělesa. Platí pro ni  $\varepsilon = \alpha$

# Přenos tepla

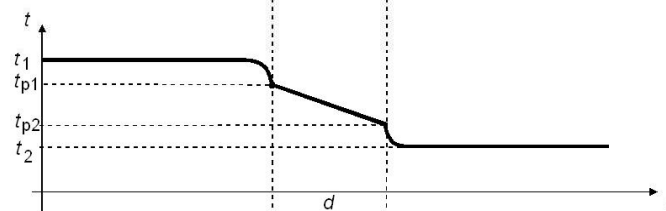
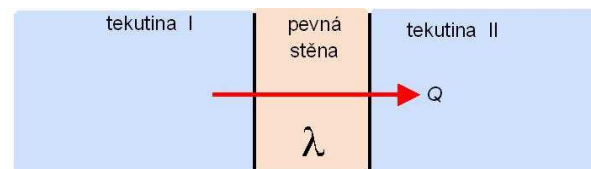
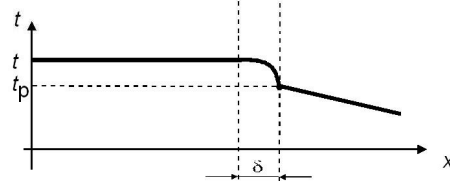
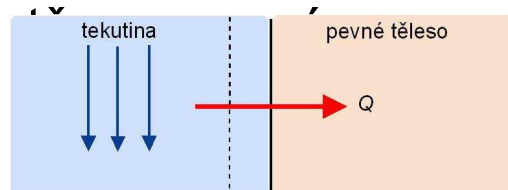
## b) Tepelná výměna prouděním

Přenos vnitřní energie prouděním je děj, při kterém se přenos vnitřní energie z míst s vyšší teplotou do míst s nižší teplotou uskutečňuje prouděním tekutiny.

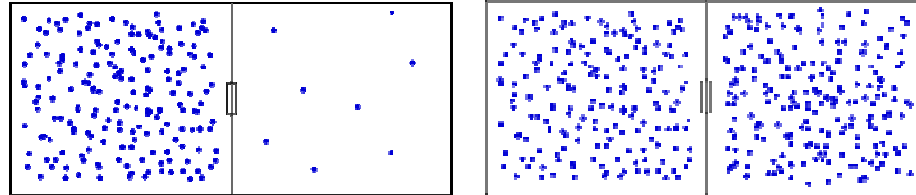
- Volné proudění (rozdílná hustota)
- Nucené proudění (ventilátor, čerpadlo)



**Přestup tepla:**  $\varphi = h \cdot (t - t_p)$ , kde  $h$  je *součinitel přestupu tepla*,  $t$  je teplota tekutiny a  $t_p$  teplota povrchu



# Entropie



Entropie  $S \longrightarrow$  "míra neurčitosti systému" („míra neuspořádanosti“)

## Clausius – Boltzmann - Gibbs

Zatímco „ostrá“ rozdělení pravděpodobnosti mají entropii nízkou, naopak „neostrá“ či „rozmazaná“ rozdělení pravděpodobnosti mají entropii vysokou.

Za pravděpodobnostní rozložení s nejvyšší entropií lze považovat normální nebo rovnoměrné rozložení.

$$S = -k \sum_i P_i \ln P_i$$

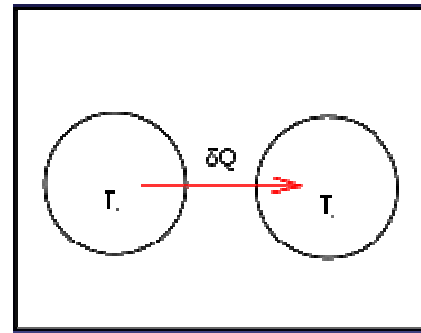
$P_i$  je pravděpodobnost  $i$ -tého mikrostavu

- Termodynamickou entropii  $S$

$$dS = \frac{\delta Q}{T}$$

- Carnotův cyklus  $\sum \frac{\delta Q}{T} = 0 \quad \oint \frac{\delta Q}{T} = 0 \longleftarrow$  **2. VT**

Ne všechna  $\delta Q$  mohou být kladná, ale některá musí být i záporná  $\longrightarrow$  soustava, která vykonává vratný kruhový děj tedy nemůže od okolních těles teplo pouze přijímat, ale musí jim také nějaké teplo odevzdávat.



# Entropie

## Princip růstu entropie

Tepelně izolovaná soustava 2 těles o teplotě  $T_1$  a  $T_2$ . Těleso 1 odevzdá teplo  $\delta Q_1$  a těleso 2 přijme teplo  $\delta Q_2$ , přičemž platí  $\delta Q_1 = \delta Q_2$ .

## Změna entropie

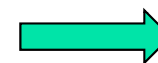
$$dS = dS_1 + dS_2 = \frac{\delta Q_1}{T_1} + \frac{\delta Q_2}{T_2} = \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \delta Q_1 = \frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \delta Q_1$$

Pro  $T_1 < T_2$  pak  $dS > 0$

Samovolné děje:  $\Delta S_{\text{tot}} > 0$

Při vratném adiabatickém ději může být tedy entropie stálá, avšak nikdy nemůže klesat.

V přírodě – nevratné děje (tření, odporové síly)



$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

Pokud při nevratném ději působí tření, takže vykonaná práce je menší a v soustavě vzniká třením teplo, je třeba k dosažení výchozího stavu odvádět více tepla než při vratném kruhovém ději, což je vyjádřeno znaménkem nerovnosti.

Celková entropie uzavřeného systému se nemůže nikdy zmenšit. V přírodě tedy všechny děje směřují do více neuspořádaného stavu. Stejně tak roste entropie ve vesmíru. Vyrovnaní veškerých teplotních rozdílů - tepelná smrt vesmíru.

# Entropie

## 3. Termodynamický zákon - 3. VT - Nernstův teorém

*Čistou pevnou látku nelze konečným pochodem ochladit na absolutní nulu.*

Pomocí entropie:

$$\lim_{T \rightarrow 0} S = 0$$

Není možné dosáhnout  $T = 0$  K.





# Entropie

